

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO - GEOTECNIA

RAFAEL PETRONILHO DE OLIVEIRA ROCHA

**INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA COM FIBRA ÓTICA:  
MONITORAMENTO DE FRENTE DE UMEDECIMENTO E  
ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO EM  
SOLOS ARENOSOS**

CURITIBA-PR

2011

RAFAEL PETRONILHO DE OLIVEIRA ROCHA

**INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA COM FIBRA ÓTICA:  
MONITORAMENTO DE FRENTE DE UMEDECIMENTO E  
ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO EM  
SOLOS ARENOSOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Professor Dr. Alessandro Christopher Morales Kormann

CURITIBA-PR

2011

Rocha, Rafael Petronilho de Oliveira

Instrumentação geotécnica com fibra ótica: monitoramento de frente de umedecimento e análise da variação do grau de saturação em solos arenosos / Rafael Petronilho de Oliveira Rocha. – Curitiba, 2011.

112 f. : il., tabs.

Orientador: Alessandro Christopher Morales Kormann

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curso de Pós-Graduação em Construção Civil.

1. Taludes (Mecânica dos solos). 2. Estabilidade estrutural. 3. Fibras óticas. I. Kormann, Alessandro Christopher Morales. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 624.171

## TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL PETRONILHO DE OLIVEIRA ROCHA

### INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA COM FIBRA ÓTICA: MONITORAMENTO DE FRENTE DE UMEDECIMENTO E ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO EM SOLOS ARENOSOS

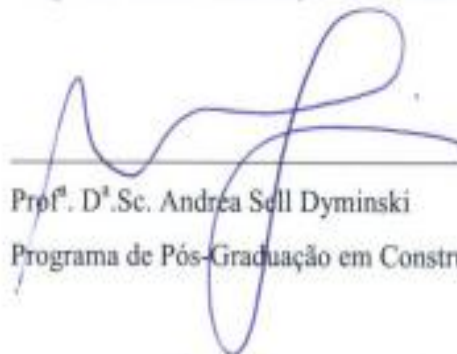
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Área de Concentração: Geotecnia, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. D.Sc. Alessandro Christopher Morales Kormann  
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - UFPR

Examinadores:



Prof. D.Sc. Andrea Sell Dyminski  
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - UFPR



Prof. D.Sc. Luiz Alkmin de Lacerda  
Departamento de Estruturas Cíveis DPEC-LACTEC/UFPR



M.Sc. Claudio dos Santos Amaral  
Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - CENPES

Curitiba, 15 de abril de 2011

## DEDICATÓRIA

**A minha Mãe Izolete de Oliveira Rocha,**  
Mulher Incomparável e Insubstituível,  
Responsável por me ensinar o significado das palavras *Amor* e *Paz*,  
Através de suas ações.

**A minha Avó Paula Bastos Pereira (*in memorian*),**  
Mulher que ilumina meu caminho com sua imensa *Fé*.

**Ao meu Pai Osmar Rocha,**  
Por sua *Coragem* e *Persistência*.

**Aos meus Irmãos Samara, Karla e Marcelo**  
Pelo *Companheirismo* e *Sinceridade*.

**A minha namorada Ariane,**  
Por todo o *amor* dedicado a minha pessoa.

**Aos meus Amigos e Parentes,**  
Por me ensinarem o significado da palavra *Confiança*.

## **AGRADECIMENTOS**

Foi com uma imensa alegria que recebi de forma inusitada o convite do meu querido orientador Alessandro Christopher Morales Kormann para participar do desenvolvimento desta pesquisa inovadora na área da geotecnia. Quero agradecê-lo pela confiança atribuída a minha pessoa e pela forma exemplar que conduziu este trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – área de concentração – GEOTECNIA da UFPR, Andrea Sell Dyminski, Eduardo Dell’Avanzi, José Marques Filho, Ney Augusto Nascimento e Sidnei Helder Cardoso Teixeira, pela dedicação e qualidade das aulas apresentadas.

Aos grandes amigos de sala de aula, Adhara Palacio Guizelini, Antônio Claudio Andrade Narel, Carlos Augusto Wosniacki, Danilo Pitz, Juliana Reinert e Thiago Barbosa Bueno, pela força, determinação e companherismo.

A equipe de funcionários do LACTEC composta por pesquisadores, bolsistas, estagiários e laboratoristas, em especial ao professor Paulo Roberto Chamecki, pela confiança em me manter como bolsista responsável pelo desenvolvimento deste trabalho. A Luiz Alkimin de Lacerda, por sua total disponibilidade em ajudar a solucionar os problemas enfrentados em todas as etapas do projeto. A Roberta Bomfim Boszczowski, pela coordenação dos trabalhos de caracterização do solo utilizado na pesquisa e pela fundamental importância no desenvolvimento dos modelos laboratoriais desenvolvidos. Aos estagiários Carina, Thais, Celso, Thierry, Rafael, tão como aos laboratoristas, Alex, Isaque e Valdevan pelos trabalhos de manipulação do solo utilizado na pesquisa.

Ao Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento – LACTE, pela bolsa de estudo concedida durante o período do curso, pela estrutura de trabalho integrada ao laboratório de solos do LAME e pela oportunidade de realização de intercâmbio com a Universidade de Innsbruck na Áustria.

Ao professor doutor Markus Aufleger e sua equipe de trabalho do Instituto de Hidráulica da Universidade de Innsbruck – IWI, formada por bolsistas, estagiários e laboratoristas, em especial aos doutorandos Matthias Goltz e Gerhard Kapeller, pelo companherismo, amizade, e pela oportunidade concedida para trabalhar em seus projetos de pesquisas.

A Universidade Federal do Paraná – UFPR por toda a ajuda prestada durante os dois anos de mestrado.

Ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (CENPES) – PETROBRAS pelo financiamento da pesquisa.

## RESUMO

A água possui papel fundamental na maioria dos deslizamentos de encostas, seja por meio de incremento de esforços solicitantes ou pela sua participação na redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. Portanto, a compreensão da dinâmica da água no solo torna-se essencial para que a engenharia geotécnica possa dispor de ferramentas que auxiliem na análise e prevenção dos deslizamentos. Foi desenvolvida nesta dissertação uma metodologia para a aplicação da tecnologia de fibra ótica no monitoramento de frente de umedecimento e análise das variações do grau de saturação em solo arenoso, objetivando sua utilização como instrumento de investigação geotécnica. Para tanto, foi montado em laboratório modelos para simulação de perfis naturais de solo, onde em seu interior foi introduzido um cabo de fibra ótica diretamente em contato com o solo arenoso. O sistema de fibra ótica adotado se baseia no método *DFOT - Distributed Fiber Optic Temperature Measurement*, que utiliza o componente espectral da luz (*Raman*) para determinação de temperatura. Os sinais óticos são gerados, processados e armazenados por uma unidade leitora *DTS - Distributed Temperature Sensor*. Buscou-se avaliar o Método do Aquecimento para estimar o posicionamento da frente de umedecimento e variação do grau de saturação em solo arenoso. A validação dos dados obtidos pelo sistema implantado nos diferentes modelos foi realizada através de comparações com respostas apresentadas por sensores de umidade tipo *FDR - Frequency Domain Reflectometry*, e sensores de temperatura tipo termômetros resistivos, sujeitos as mesmas condições de ensaio. Os resultados observados mostram a capacidade do sistema em monitorar a frente de umedecimento, e permitiram realizar avaliações de grau de saturação em solos arenosos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade de Encostas, Sensores de Fibra Ótica, Raman, DFOT.



## **ABSTRACT**

The water has a primary role in most of the landslides, either by increase of applicants efforts or their participation in the reduction of the shear strength parameters of soil. Therefore, understanding the dynamic process of water in soil is essential for the geotechnical engineering have tools to help in analysis and prevention of landslides. It was developed in this dissertation a methodology for the application of optical fiber technology for monitoring of wet front and to analyze the variation of degree of saturation into the sand soil, aiming its use as a tool for geotechnical investigation. For both was developed laboratory models, that served as simulators of a naturals soil profile, which was introduce inside a fiber optical cable in direct contact with the sand soil. The optical fiber system is based on the method adopted DFOT - Distributed Fiber Optic Temperature Measurement, which uses the spectral component of light (Raman) to determine the temperature. The optical signals are generated, processed and stored by a reader drive DTS - Distributed Temperature Sensor. We sought to evaluate the heating method to estimate the position of the wetting front and variation of the degree of saturation in sandy soil. The validation of data obtained by the implanted system in the models was performed by comparisons with answers provided by moisture sensors type FDR - Frequency Domain Reflectometer and temperature sensors type resistive thermometers, subjects the same test conditions. The results show the system's ability to monitor the wetting front, and allowed to perform assessments of the degree of saturation in sandy soils.

**KEYWORDS: Slope Stability, Fiber Optic Sensors, Raman, DFOT.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Deslizamento de terra causada pela influência da chuva (Acervo Nova Friburgo, 2011).....	24
Figura 2.1. Ciclo hidrológico natural sobre um perfil de solo não saturado (adaptado de LU e LIKOS, 2004).....	26
Figura 2.2. Perfil de umidade e suas características, após algum tempo de iniciada a infiltração (adaptado de PREVEDELLO, 1996). ....	27
Figura 2.3. Descrição dos perfis de teor de umidade durante a infiltração, redistribuição e drenagem do solo (adaptado de EPA, 1998). ....	28
Figura 2.4. Elevação de água em tubos capilares de vários tamanhos (adaptado de LU e LIKOS, 2004).....	30
Figura 2.5. Equilíbrio mecânico de aumento capilar em tubo de pequeno diâmetro (LU e LIKOS, 2004).....	31
Figura 2.6. Curva característica típica de solo arenoso, siltoso e argiloso (Adaptado de FREDLUNG e XING, 1994).....	32
Figura 2.7. Curva característica típica de um solo siltoso (adaptado de FREDLUNG e XING, 1994).....	33
Figura 2.8. Superfície de ruptura influenciada pela sucção (adaptado de LU & LIKOS (1994), citado por MICHELETTO (2007)).....	35
Figura 2.9. Não linearidade de $\phi b$ (adaptado de LU & LIKOS (1994), citado por MICHELETTO (2007)).....	36
Figura 2.10. Queda ou Desprendimento (USGS, 2009).....	38
Figura 2.11. Tombamento (USGS, 2009).....	38
Figura 2.12. Escorregamento: (A) Rotacional; (B) Translacional (USGS, 2009).....	38
Figura 2.13. Espalhamento (USGS, 2009) .....	39
Figura 2.14. Rastejo (USGS, 2009).....	39
Figura 2.15. Corridas: (A) de detritos; (B) de terra (USGS, 2009) .....	40
Figura 2.16. Representação do funcionamento de um LVDT (OMEGA ENGINEERING, 2002).....	43
Figura 2.17. Comportamento dos raios de luz incididos em meios com diferentes índices de refração (adaptado de Bailey e Wright, 2003).....	45
Figura 2.18. Perfil típico de uma fibra ótica (adaptado de Bailey e Wright, 2003) .....	46

Figura 2.19. Seções transversais dos diferentes tipos de fibras óticas (adaptado de FURUKAWA, 2010).....	47
Figura 2.20. Cone de aceitação de uma fibra ótica (adaptado de Bailey e Wright, 2003) .....	48
Figura 2.21. Perfil do índice de refração, (a) homogêneo; (b) variável (Adaptado de Bailey e Wright, 2003) .....	48
Figura 2.22. Características dos diferentes tipos de fibra (adaptado de Bailey e Wright, 2003). .....	49
Figura 2.23. Comparação da taxa de dados, distância, tipo de fibra e tipo de equipamento que origina o sinal luminoso (Adaptado de Bailey e Wright, 2003). .....	50
Figura 2.24. Fatores que causam atenuação ótica por conexão (Adaptado de FURUKAWA, 2010).....	51
Figura 2.25. Espectro da luz retro espelhada (adaptado de Smolen e Spek, 2003).....	52
Figura 2.26. Luz sendo retro espelhada para o equipamento de projeção (Adaptado de Smolen e Spek, 2003). .....	53
Figura 2.27. Luz sendo retro espelhada para o equipamento de projeção (Adaptado de Smolen e Spek, 2003). .....	53
Figura 2.28. Diferenciação entre o método do gradiente e o método do aquecimento (adaptado de Aufleger e Goltz, 2009). .....	55
Figura 2.29. Seção transversal típica de um cabo de fibra ótica utilizada no método do aquecimento.....	55
Figura 2.30. Desenvolvimento da temperatura no interior do cabo e as diferenças de temperatura calculadas (adaptado de PERZLMAIER et al, 2004).....	56
Figura 2.31. Propagação de calor por condução em um meio poroso seco (a) e úmido (b) (PREVEDELLO, 1996).....	56
Figura 2.32. Influência da densidade e grau de saturação na condutividade térmica do solo (BECKER e FRICKE, 1997).....	57
Figura 2.33. Distribuição de temperatura sobre a seção transversal de um cabo esquemático devido à convecção (esquerda) e a condução (direita), (adaptado de PERZLMAIER et al, 2006).....	57
Figura 2.34. Medidas de temperatura durante um ciclo de aquecimento (adaptado de GOLTZ e AUFLEGER, 2009). .....	58
Figura 3.1. Layout do modelo utilizado para calibração dos diferentes cabos de fibra ótica (adaptado de GOLTZ e AUFLEGER, 2009). .....	62

Figura 3.2. Teste de campo realizado pela universidade de Innsbruck na bacia hidrográfica de Loehnersbach, em Salzburg, Áustria (do autor).	63
Figura 3.3. Distribuição linear da fibra em diferentes camadas do solo (do autor).	64
Figura 3.4. Vantagem do SHFO. (do autor).	65
Figura 3.5. Esquema típico do SHFO empregado no ensaio. (do autor).	66
Figura 3.6. Modelo utilizado para simular a frente de umedecimento (TFU) (do autor).	68
Figura 3.7. Curva granulométrica do solo utilizado	69
Figura 3.8. Curva característica do solo utilizado	69
Figura 3.9. Processo de secagem da areia ensaiada.	71
Figura 3.10. <i>Big Bag</i> utilizados para estocagem e transporte do solo.	72
Figura 3.11. Distribuição do cabo de fibra ótica (do autor)	73
Figura 3.12. Configuração do modelo utilizado para simular a frente de umedecimento (do autor).	74
Figura 3.13. Configuração do sistema de aquisição de dados (do autor)	75
Figura 3.14. Calibração dos parâmetros <i>slope</i> e <i>offset</i> (do autor)	76
Figura 3.15. Modelo utilizado para analisar a variação do grau de saturação (TGS) (do autor).	78
Figura 3.16. Esquema típico do SHFO empregado no ensaio (do autor).	79
Figura 3.17. Distribuição do cabo de fibra ótica (do autor).	80
Figura 3.18. Preenchimento dos TGS (do autor).	82
Figura 3.19. Configuração do sistema de aquisição de dados (do autor).	82
Figura 3.20. Relação linear entre o fluxo de calor ( $q_l$ ) e a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) (PERZLMAIER, 2007).	84
Figura 3.21. Calor de entrada medido durante os ensaios de frente de umedecimento pela FCC 900-30i.	84
Figura 3.22. Calor de entrada medido durante os ensaios de grau de saturação pela FCC 900-30i.	85
Figura 3.23. Curvas de calibração dos sensores FDR - Rádio 1	86
Figura 3.24. Curvas de calibração dos sensores FDR - Rádio 2	86
Figura 4.1. Característica típica das curvas obtidas pelos diferentes sensores, (A) frente de umedecimento e (B) grau de saturação (do autor).	87
Figura 4.2. Frente de umedecimento identificada pelos sensores de umidade FDR - (E1).	89
Figura 4.3. Frente de umedecimento identificada pelos sensores de umidade FDR - (E2).	89
Figura 4.4. Frente de umedecimento identificada pelos sensores de temperatura TR - (E1).	90

Figura 4.5. Frente de umedecimento identificada pelos sensores de temperatura TR - (E2)...	90
Figura 4.6. Frente de umedecimento identificada pelo sensor distribuído DTS - (E1).....	91
Figura 4.7. Frente de umedecimento identificada pelo sensor distribuído DTS - (E2).....	92
Figura 4.8. Influência da densidade e umidade na condutividade térmica do solo. ....	93
Figura 4.9 Frente de umedecimento – Correlação entre FDR2, TR1 e DTS - (E1). ....	93
Figura 4.10. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR5, TR2 e DTS – (E1). ....	94
Figura 4.11. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR8, TR3 e DTS – (E1). ....	94
Figura 4.12. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR2, TR1 e DTS - (E2). ....	95
Figura 4.13. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR5, TR2 e DTS - (E2). ....	95
Figura 4.14. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR8, TR3 e DTS - (E2). ....	95
Figura 4.15. Características das curvas de aquecimento geradas no mesmo ponto (FDR5), sob diferentes graus de saturação. ....	97
Figura 4.16. Curva de aquecimento para solo com 0% de grau de saturação – (EGS1 – C1 e C2). ....	98
Figura 4.17. Curva de aquecimento para o solo com 80% de grau de saturação – (EGS1 – C1 e C2). ....	98
Figura 4.18. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação – (EGS1 – C1). ....	99
Figura 4.19. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação – (EGS1 – C2). ....	99
Figura 4.20. Curva de aquecimento para solo com 5% de grau de saturação – (EGS2 – C1 e C2). ....	100
Figura 4.21. Curva de aquecimento para solo com 45% de grau de saturação – (EGS2 – C1 e C2). ....	100
Figura 4.22. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação – (EGS2 – C1). ....	101
Figura 4.23. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação – (EGS2 – C2). ....	101
Figura 4.24. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação nos diferentes ensaios EGS1 e EGS2. ....	102
Figura 4.25. Variação da resposta de temperatura em função da disposição do cabo de fibra ótica em forma de helicóide. ....	103
Figura 4.26. Condutividade térmica obtida a partir do modelo de Kristiansen (1982) citado por Goltz e Aufleger (2009). ....	103

Figura 5.1. Distribuição helicoidal da fibra e suas limitações (do autor).....	104
Figura 5.2. Análise do perfil estratigráfico através das curvas de aquecimento (do autor)....	106
Figura 5.3. Determinação do posicionamento do lençol freático através das curvas de aquecimento (do autor).....	106
Figura 5.4. Esquema típico para melhoramento do SHFO (do autor).....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Tipos de deslizamentos (Adaptado de Varnes, 1978) .....	40
Tabela 2.2. Índice de refração para os diferentes meios ( $\lambda = 589\text{nm}$ ) (AUFLEGER, 2000)...	44
Tabela 2.3. Classificação dos diferentes tipos de fibra (do autor, 2011).....	46
Tabela 2.4. Aplicação dos diferentes métodos de previsão (Farouki (1986) citado por Becker & Fricke, 1997). .....	60
Tabela 3.1. Características do Cabo de fibra ótica .....	65
Tabela 3.2. Parâmetros de ajuste da curva característica do solo.....	70
Tabela 3.3. Determinação do peso do solo seco.....	73
Tabela 3.4. Dimensionamento do sistema de aquecimento.....	76
Tabela 3.5. Determinação do peso de solo seco. ....	80
Tabela 3.6. Determinação do volume de solo .....	81
Tabela 3.7. Determinação do peso de solo e água para os diferentes graus de saturação .....	81
Tabela 4.1. Determinação dos horários da frente de umedecimento – (E1).....	96
Tabela 4.2. Determinação dos horários da frente de umedecimento – (E2).....	96

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	– <i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada ou alternada)
CRUS	– Curva de Retenção de Umidade do Solo
DC	– <i>Direct Current</i> (Corrente Direta ou Corrente Contínua)
DFOT	– <i>Distributed Fiber Optic Temperature Measurement</i> (Medições Distribuídas em Fibra Ótica de Temperatura)
DTS	– <i>Distributed Temperature Sensor</i> (Sensor Distribuído de Temperatura)
DTSS	– <i>Distributed Temperature and Strain Sensor</i> (Sensor Distribuído de Temperatura e Deformação)
EGS	– Ensaio de Grau de Saturação
EPA	– <i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção ao Meio Ambiente)
FCC	– Fonte de Corrente Contínua
FDR	– <i>Frequency Domain Reflectometer</i> (Reflectômetro com Domínio de Frequência)
FU	– Frente de Umedecimento
IC	– Índice Constante
IG	– Índice Gradual
IWI	– Institut für Wasserbau der Innsbruck (Instituto de Hidráulica de Innsbruck)
LED	– Light-emitting Diode
LVDT	– Linear Variable Differential Transformer (Transformador Diferencial de Variação Linear)
Mn/M	– Mono-Modo
Mt/M	– Multi-Modo
NA	– Numerical Aperture (Abertura Numérica)
PEAD	– Polietileno de Alta Densidade
PVC	– Policloreto de Vinila
SHFO	– Sistema Helicoidal de Fibra Ótica
SPT	– Stander Penetration Test (Teste de Penetração Padrão)
TFU	– Tubo de Frente de Umedecimento
TGS	– Tubo de Grau de Saturação
TR	– Termômetro Resistivo
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
USB	– Universal Serial Bus
USGS	– United State Geological Survey (Mapeamento Geológico dos Estados Unidos)



## LISTA DE SÍMBOLOS

A	– Seção de referência
$A_{el}$	– Área da seção transversal de cobre
B	– Seção de aquecimento
C	– Seção de resfriamento
$c'$	– Coesão efetiva
d	– Diâmetro do tubo capilar
D	– Diâmetro do núcleo da fibra ótica
$D_c$	– Diâmetro do cabo de fibra ótica
e	– Excentricidade
$e$	– Índice de vazios
$e_{max.}$	– Índice de vazios máximos
$e_{min.}$	– Índice de vazios mínimos
f	– Constante de calibração
$f_0$	– Dados lidos
g	– Aceleração gravitacional
$h_x$	– Ascensão capilar
H	– Condutância
I	– Corrente elétrica
k	– Coeficiente de permeabilidade
$L_{el}$	– Comprimento de fios de cobre
$L_{fo}$	– Comprimento do cabo de fibra ótica
$L_{pl}$	– Comprimento do pulso de luz
M	– Número de modo
$M_s$	– Massa dos sólidos do solo
$M_w$	– Massa de água
n	- Porosidade
$n_a$	- Índice de refração do ar
$n_1$	– Índice de refração do revestimento primário
$n_2$	– Índice de refração do núcleo
$n_x$	– Índice de refração
q	– Fração volumétrica do quartzo
ql	– Fluxo de calor

$Q$  – Potência total

$r_{\text{ext}}$  – Raio externo do cabo de fibra ótica

$R^2$  – Coeficiente de correlação

$R_{\text{el}}$  – Resistência elétrica

$S$  – Grau de saturação

$S_r$  – Grau de saturação residual

$t$  - Tempo

$t_0$  – Início do ensaio

$t_{0\text{hot}}$  – Início do aquecimento

$t_x$  – Tempo de projeção de um pulso de luz

$T$  – Temperatura

$T_G$  – Temperatura do meio entorno da fibra ótica

$T_s$  – Tensão superficial

$T_w$  – Temperatura da água

$u_a$  – Poro-pressão do ar

$u_w$  – Poro-pressão de água

$U$  – Tensão elétrica

$v$  – Velocidade do fluxo

$V$  – Volume total de solo

$V_{\text{est}}$  – Volume da estrutura metálica

$V_{\text{fo}}$  - Volume da fibra ótica

$V_o$  – Variação da voltagem

$V_s$  – Volume de sólidos

$V_{\text{tb}}$  – Volume do tubo de PVC

$V_{\text{un}}$  – Volume do tubo de grau de saturação

$V_v$  – Volume de vazios

$V_w$  – Volume de água

$w$  – Teor de umidade gravitacional

$Z_w$  – Distância entre o ponto a ser medido e o nível do lençol freático

$\alpha$  - Ângulo de contato solo/água

$\chi$  – Parâmetro dependente do tipo de solo e do grau de saturação

$\Delta_T$  – Variação de temperatura

$\gamma$  – Constante de Euler Mascheroni

$\gamma_s$  – Peso específico real dos grãos

$\gamma_w$  – Peso específico da água

$\kappa$  – Difusividade térmica

$\lambda$  – Condutividade térmica

$\lambda_{dry}$  – Condutividade térmica no estado seco

$\lambda_o$  – Condutividade térmica dos outros minerais

$\lambda_q$  – Condutividade térmica do quartzo

$\lambda_s$  – Condutividade térmica dos sólidos

$\lambda_{sat}$  – Condutividade térmica no estado saturado

$\lambda_w$  – Condutividade térmica da água

$\lambda$  – Comprimento de onda

$\lambda_l$  – Comprimento de onda da luz irradiada

$\mu$  – Calor específico volumétrico

$v$  – Velocidade da luz

$v_0$  – Velocidade da luz no vácuo

$v_x$  – Velocidade da luz no meio

$\phi'$  – Ângulo de atrito efetivo

$\phi^b$  – Ângulo devido ao acréscimo de resistência provocado pelo aumento da sucção

$\Psi$  – Potencial de energia presente sobre as partículas de água no interior do solo

$\Psi_g$  – Potencial gravitacional

$\Psi_h$  – Potencial hidráulico

$\Psi_m$  – Potencial mátrico

$\Psi_o$  – Potencial osmótico

$\Psi_p$  – Potencial de pressão

$\Psi_t$  – Potencial de temperatura

$\rho_d$  – Peso específico seco

$\rho_{el}$  – Resistência específica do cobre

$\rho_s$  – Peso específico dos sólidos

$\rho_w$  – Peso específico da água

$\sigma'$  – Tensão efetiva

$\sigma$  – Tensão total

$\tau$  – Tensão cisalhante

$\theta$  – Teor de umidade volumétrico

$\theta_1$  – Ângulo de aceitação

$\theta_c$  – Ângulo crítico

$\theta_i$  – Ângulo de incidência

$\theta_r$  – Teor de umidade residual

$\theta_{\text{refl}}$  – Ângulo refletido

$\theta_{\text{refr}}$  – Ângulo refratado

$\theta_s$  – Teor de umidade de saturação

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1. OBJETIVO PRINCIPAL .....	24
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	25
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>26</b>
2.1. SOLOS NÃO SATURADOS .....	26
2.1.1. <i>Dinâmica da água no solo</i> .....	26
2.2. ENCOSTAS NATURAIS .....	37
2.2.1. <i>Classificação dos tipos de deslizamentos</i> .....	37
2.2.2. <i>Monitoramento de Encostas</i> .....	40
2.2.3. <i>Tipos de instrumentação disponível</i> .....	41
2.3. TECNOLOGIA DE FIBRA ÓTICA.....	44
2.3.1. <i>Medidas distribuídas de temperatura com base em tecnologia de fibra ótica</i> .....	51
2.3.2. <i>Método do Gradiente</i> .....	54
2.3.3. <i>Método do Aquecimento</i> .....	54
<b>3. METODOLOGIA DA PESQUISA.....</b>	<b>62</b>
3.1. DEFINIÇÃO .....	62
3.2. MONITORAMENTO DA FRENTE DE UMEDECIMENTO .....	64
3.2.1. <i>Desenvolvimento do Sistema Helicoidal de Fibra Ótica - SHFO</i> .....	64
3.2.2. <i>Desenvolvimento do modelo para simulação da frente de umedecimento</i> .....	66
3.2.3. <i>Execução do ensaio</i> .....	72
3.3. ANÁLISE DO GRAU DE SATURAÇÃO.....	78
3.3.1. <i>Desenvolvimento do modelo para simular a variação do grau de saturação</i> .....	78
3.3.2. <i>Execução do ensaio</i> .....	81
3.4. CALIBRAÇÃO DOS DADOS .....	83
3.4.1. <i>Sensor de Temperatura – DTS</i> .....	83
3.4.2. <i>Sensor de temperatura – TR</i> .....	85
3.4.3. <i>Sensor de umidade - FDR</i> .....	85
<b>4. RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>87</b>

4.1.	MONITORAMENTO DA FRENTE DE UMEDECIMENTO .....	88
4.1.1.	<i>Sensores de Umidade Volumétrica – FDR.....</i>	88
4.1.2.	<i>Sensores de Temperatura Resistivos – TR.....</i>	89
4.1.3.	<i>Sensores de Temperatura Distribuídos – DTS .....</i>	91
4.1.4.	<i>Correlação dos dados.....</i>	93
4.2.	ANÁLISE DO GRAU DE SATURAÇÃO.....	97
4.2.1.	<i>Determinação das curvas de aquecimento – Ensaio 1 (EGS1).....</i>	98
4.2.2.	<i>Determinação das curvas de aquecimento – Ensaio 2 (EGS2).....</i>	99
4.2.3.	<i>Análise da condutividade térmica .....</i>	102
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>104</b>
5.1.	POTENCIALIDADES DO EMPREGO DA TECNOLOGIA DTS .....	105
5.1.1.	<i>Análise do perfil estratigráfico de solos.....</i>	105
5.1.2.	<i>Identificação do nível do lençol freático .....</i>	106
5.2.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	107
5.2.1.	<i>Monitoramento da frente de umedecimento .....</i>	107
5.2.2.	<i>Análise da variação do grau de saturação.....</i>	107
5.2.3.	<i>Melhoramento do Sistema Helicoidal de Fibra Ótica - SHFO.....</i>	107
	<b>REFERÊNCIAS DA LITERATURA .....</b>	<b>109</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Movimentos de massa correspondem aos mecanismos de transporte de sedimentos, solos ou rochas, que são induzidos pela força gravitacional e pela ação conjunta ou isolada de fatores como a presença de águas superficiais e subterrâneas ou ações antrópicas como desmatamentos, cortes e aterros, entre outras (SILVEIRA, 2008). A susceptibilidade de uma instabilidade em uma encosta depende da sua topografia, das características litológicas e geotécnicas do material que a compõe, da superfície do solo local, das condições hidrológicas, entre outras (NADIM e LACASSE, 2004).

A água possui papel fundamental na maioria dos deslizamentos, seja por meio de incremento de esforços solicitantes (aumento do peso específico aparente do solo devido à elevação da sua umidade, desenvolvimento de pressões hidrostáticas em fraturas da rocha e aumento das poro-pressões devido à percolação) ou pela sua participação na redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (redução ou eliminação da sucção dos solos inicialmente no estado não saturado) (CARDOSO Jr, 2006).

Uma das formas da ocorrência de deslizamentos em encostas é devida à elevação do nível de água pré-existente, resultado da água infiltrada. A ruptura no talude é determinada, em determinados casos, por uma elevação quase instantânea do nível freático, passível de ocorrência quando a frente de umedecimento atinge o lençol freático. Esse fato pode gerar um acréscimo brusco das pressões neutras no perfil de solo, o que acarreta a ruptura do talude devido à diminuição das tensões efetivas. A elevação gradual do nível de água também pode ser provocada pela formação de uma rede de fluxo paralela ou subparalela ao talude, sustentada por um horizonte menos permeável que o horizonte superficial (WOLLE, 1988).

A estabilidade de taludes naturais de solos residuais e coluvionares é um assunto dos mais relevantes ao longo da costa tropical do Brasil. Estes taludes estão quase em sua totalidade localizados acima do nível freático local, ocasionando o surgimento de pressões de atração entre as partículas dos solos, a sucção. Esta sucção tem ação primordial na resistência ao cisalhamento dos solos. Quando ocorre uma precipitação, estas pressões de atração diminuem, diminuindo a resistência do solo (CARDOSO Jr, 2006).

Deslizamentos devido à redução da sucção pela infiltração da água da chuva em solos não saturados têm causado grande número de vítimas e danos materiais (SOARES, 2006). A Figura 1.1 ilustra uma área do Morro da Vilage em Nova Friburgo, antes (à direita) e após (à esquerda) a ocorrência de deslizamentos de terra causados pela influência da água em uma encosta densamente ocupada.



Figura 1.1. Deslizamento de terra causada pela influência da chuva (Acervo Nova Friburgo, 2011).

Assim sendo, a compreensão da dinâmica da água no interior dos solos é essencial para que a engenharia geotécnica possa dispor de parâmetros adequados para analisar e prever estes tipos de deslizamentos.

### 1.1. Objetivo Principal

Diante desta problemática, tem-se como objetivo principal dessa dissertação de mestrado o desenvolvimento de uma metodologia para monitoramento da frente de umedecimento e análise da variação do grau de saturação em solos arenosos com base em tecnologia de fibra ótica, tendo em vista a importância da água como agente redutor dos parâmetros de resistência do solo.

A técnica utilizada se baseia no método *DFOT - Distributed Fiber Optic Temperature Measurement*, que utiliza o componente espectral da luz “Raman” para determinação de temperatura.

As características térmicas do meio, no caso o solo, possuem comportamentos distintos quando ocorre a variação de parâmetros como: composição mineralógica, grau de saturação, densidade, entre outros. Por este motivo, considera-se válida a hipótese de poder monitorá-los.



## **1.2. Objetivos Específicos**

O cumprimento do objetivo principal desta dissertação se fez através do desenvolvimento das etapas listadas abaixo:

- Desenvolvimento de modelos em escala real para monitoramento de frente de umedecimento e análise da variação do grau de saturação;
- Avaliação do Método do Aquecimento no monitoramento de frente de umedecimento;
- Aplicação do Método do Aquecimento para analisar a variação do grau de saturação em solos arenosos.

## **1.3. Estrutura da Dissertação**

O capítulo 2 irá conceituar e descrever alguns processos e parâmetros físicos do solo relacionados com o objetivo do trabalho como, por exemplo: Ciclos Hidrológicos e a Dinâmica da Água em Solos Não Saturados e Encostas Naturais, além da tecnologia de fibra ótica, a qual utiliza medidas distribuídas de temperatura para o monitoramento de obras geotécnicas.

O capítulo 3 relatará a metodologia empregada na pesquisa, de forma a esclarecer os processos executivos dos ensaios.

O capítulo 4 apresentará os resultados obtidos, juntamente com sua análise e discussão.

Finalizando, o capítulo 5 apresentará as conclusões observadas, além de relatar algumas potencialidades do emprego da tecnologia de fibra ótica no monitoramento de obras geotécnicas e sugerir trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Solos não saturados

#### 2.1.1. Dinâmica da água no solo

Aproximadamente 1.386.000.000 km<sup>3</sup> de água existem na terra, sendo que deste total 96,5% estão presentes nos oceanos e dos 3,5% restantes, 1,74% se encontram no estado sólido como geleiras e neve, 0,06% em lagos, rios, biomassa e atmosfera, e 1,70% estão estocadas no solo. A água está em constante movimento no interior destes ambientes e entre eles, e este constante movimento se refere ao ciclo hidrológico ou ciclo de água (PINDER e CELIA, 2006).

Devido a este processo cíclico e natural do meio, os solos estão sujeitos diariamente ao processo de infiltração, redistribuição e drenagem de água, sendo que sua intensidade depende exclusivamente da extensão global dos fatores climáticos como precipitação, evaporação e evapotranspiração (LU e LIKOS, 2004). A Figura 2.1 ilustra um processo típico do ciclo hidrológico atuando sobre uma encosta natural de solo provida de zonas não saturadas e saturadas.

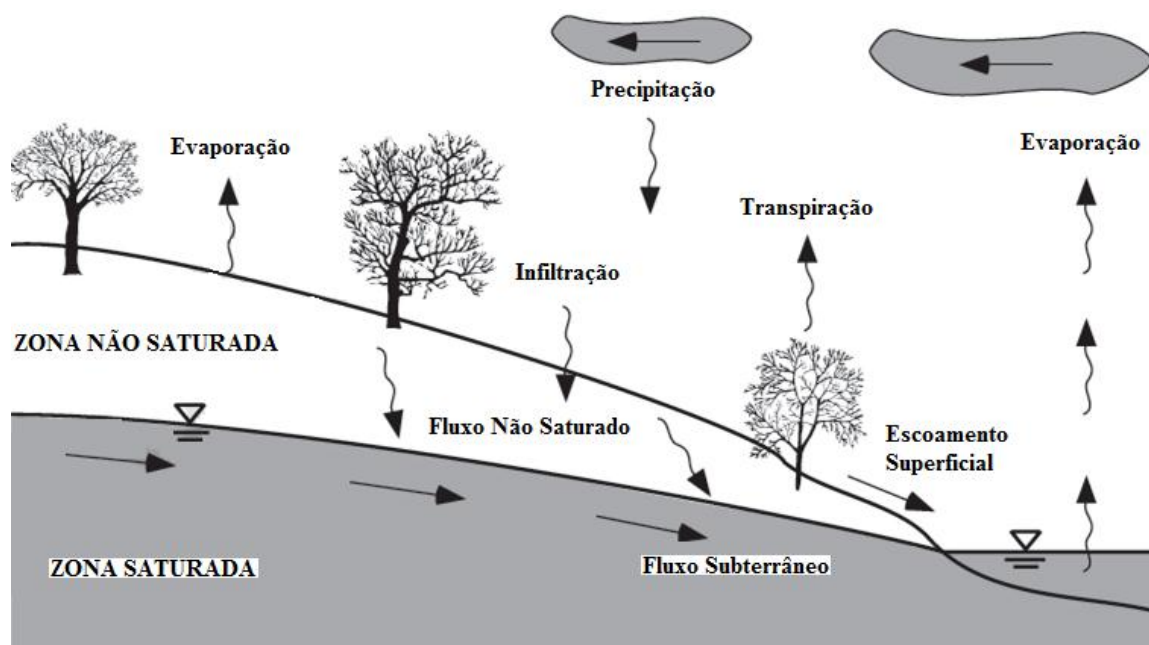


Figura 2.1. Ciclo hidrológico natural sobre um perfil de solo não saturado (adaptado de LU e LIKOS, 2004).

Segundo Prevedello (1996) a infiltração de água no solo ocorre por um processo típico de regime transiente e que após um determinado período de tempo promove a distribuição em

profundidade de um perfil de umidade dividido em zonas de saturação, transição, transmissão, molhamento e frente de molhamento, também chamada de frente de umedecimento (Figura 2.2).

A *Zona Saturada* é caracterizada por apresentar uma pequena espessura e está localizada imediatamente abaixo da superfície do solo. Em seguida se encontra a *Zona de Transição* presente entre a zona saturada e a zona de transmissão, geralmente imperceptível e é onde se inicia o decréscimo de umidade. A distinção entre esta zona e a zona saturada é pouco perceptível e é dependente da estrutura do solo e da presença de ar ocluso no interior dos poros do solo. A *Zona de Transmissão* possui espessura que varia continuamente até o final do aporte de água na superfície do solo, porém a taxa de variação da umidade do solo é praticamente constante e próxima da saturação. A partir desta vêm a *Zona de Molhamento*, que é uma região de variação relativamente rápida de umidade. A *Frente de Molhamento ou Frente de Umedecimento* é a interface do solo nas condições iniciais com as do avanço da umidade, a partir da qual se observa uma enorme variação de energia no meio e que apresenta o limite visível da penetração da água.

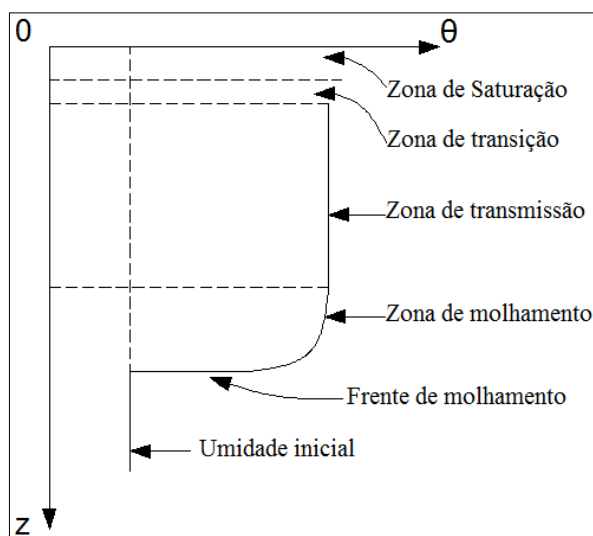


Figura 2.2. Perfil de umidade e suas características, após algum tempo de iniciada a infiltração (adaptado de PREVEDELLO, 1996).

O perfil de umidade apresentado na Figura 2.2 é resultado do processo de infiltração da água no solo, ou seja, quando ocorre seu umedecimento. O mesmo é alterado quando é finalizado o aporte de água, pois a partir deste momento ocorre a redistribuição e drenagem da água do solo (EPA, 1998), que é caracterizado por aumentar a umidade de camadas mais

profundas pela água contida nas camadas superficiais inicialmente umedecidas (JURY et. al., 1991, citado por LOYOLA e PREVEDELLO, 2003) (Figura 2.3).

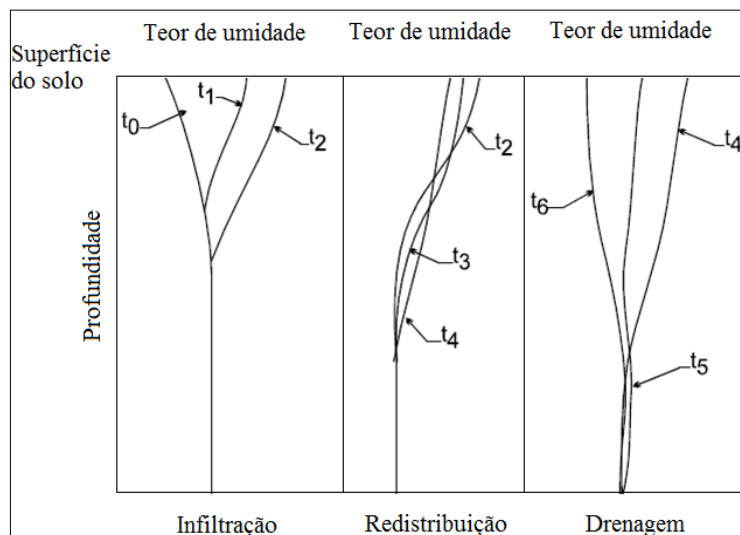


Figura 2.3. Descrição dos perfis de teor de umidade durante a infiltração, redistribuição e drenagem do solo (adaptado de EPA, 1998).

A direção e intensidade com que a água se movimenta durante os processos supracitados são governados pelo gradiente gerado após a água atingir o solo, pois como um outro corpo qualquer, a água pode ser considerada um estado de energia subdividida em energia cinética, devido à sua velocidade instantânea e em energia potencial, devido à sua posição instantânea em relação a um campo de forças.

Em termos práticos, a água no solo se move a uma velocidade muito lenta, e possui um nível extremamente baixo de energia cinética. Além disso, a maioria dos processos que envolvem água no solo é regida por alterações na energia potencial e podem ser analisadas sem considerar a energia cinética (LAL e SHUKLA, 2004).

Os potenciais presentes sobre a partícula de água é resultado do gradiente gerado pela variação de temperatura ( $\psi_t$ ), de pressão ( $\psi_p$ ), de posição em relação a um determinado ponto ou gravitacional ( $\psi_g$ ), variação da concentração de solutos do meio ou osmótica ( $\psi_o$ ), e pela variação do teor de umidade do solo ou matricial ( $\psi_m$ ).

A soma destas energias resulta em um potencial total da água no solo e pode ser denominada como potencial hidráulico ( $\psi_h$ ) (Equação 2.1).

$$\psi_h = \psi_t + \psi_p + \psi_g + \psi_o + \psi_m \quad (\text{Eq. - 2.1})$$

O potencial gravitacional é desprezível da mesma forma como a energia potencial térmica pode ser desprezada devido à pequena variação de temperatura do meio. A componente de pressão também é desconsiderada caso os poros do solo estejam conectados com a atmosfera, pois a pressão atuante sobre a água é inferior a pressão atmosférica, caso contrário, seu valor será considerado positivo.

Portanto a (Eq. – 2.1) pode ser reescrita da seguinte forma (Equação 2.2):

$$\psi_h = \psi_p + \psi_o + \psi_m \quad (\text{Eq. - 2.2})$$

Considerando os termos da (Eq. – 2.2) como pressões equivalentes, podemos então separar a equação em dois termos, sendo um equivalente a poro-pressão positiva ( $\psi_p$ ), onde sua ocorrência se dá em solos saturados, e seu valor é determinado pela Equação 2.3, e outro equivalente a poro-pressão negativa ou sucção total, que é contribuída pelas parcelas osmótica e matricial, expressa pela Equação 2.4.

$$\psi_p = u_w = \gamma_w \cdot Z_w \quad (\text{Eq. - 2.3})$$

Onde:

$\gamma_w$  = peso específico da água;

$Z_w$  = distância entre o ponto a ser medido e o nível do lençol freático.

$$\psi_T = \psi_o + \psi_m \quad (\text{Eq. - 2.4})$$

A sucção osmótica está relacionada aos solutos dissolvidos na água intersticial, geralmente originados por processos externos como lixiviação de solos ou pela presença de solutos adsorvidos na superfície dos minerais do solo. Desta forma seu valor aumenta com o aumento da concentração de solutos no solo. Seu valor é constante ao longo de toda a variação do teor de umidade, ao menos que a concentração de solutos não varie.

A sucção mátrica está relacionada ao fenômeno de capilaridade presente acima do nível do lençol freático, resultado da tensão superficial do líquido em contato com a parede dos poros, e à presença de água adsorvida no solo (LU e LIKOS, 2004). Seu valor é determinado através da Equação 2.5:

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (\text{Eq. - 2.5})$$

Onde:

$u_a$  = poro-pressão do ar, referente à pressão atmosférica, e tomada como valor de referência = 0;

$u_w$  = poro pressão da água, devido ao fenômeno de capilaridade e adsorção da água este valor é negativo, tendo como referência o valor de  $u_a$ .

De forma a simplificar o entendimento do fenômeno capilar presente em solos, são ilustrados na Figura 2.4, tubos de diferentes diâmetros em contato com a água, simulando um perfil de solo na presença de lençol freático. Observa-se que o aumento capilar é influenciado pela redução do diâmetro do tubo, da mesma forma que ocorre o aumento da pressão negativa, sucção mátrica. Seu valor é nulo ao nível do lençol freático.

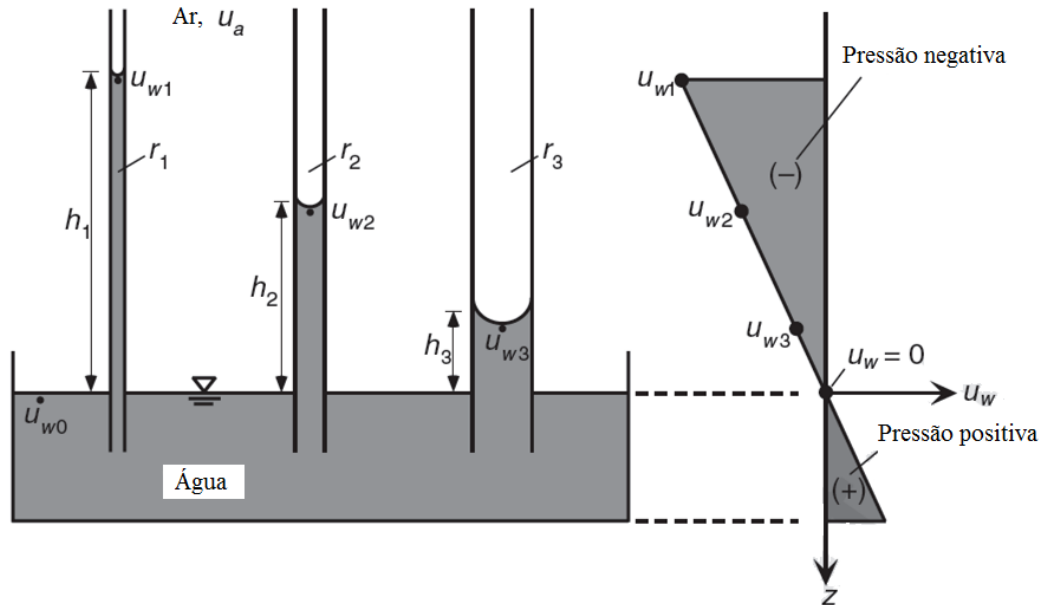


Figura 2.4. Elevação de água em tubos capilares de vários tamanhos (adaptado de LU e LIKOS, 2004).

A ascensão capilar ( $h_x$ ) pode ser determinada através da aplicação do modelo analítico baseado na derivação da equação de Laplace, conforme apresentada na Equação 2.6. Sendo a pressão negativa presente no interior dos poros inversamente proporcional ao diâmetro do menisco formado e diretamente proporcional à tensão superficial e ao ângulo de contato da água com o solo (LU e LIKOS, 2004).

$$h_x = (u_a - u_w) = \frac{4T_s \cos \alpha}{d \rho_w g} \quad (\text{Eq. - 2.6})$$

Onde:

$T_s$ : tensão superficial;

$\alpha$ : ângulo de contato solo/água;

$d$ : diâmetro do tubo capilar;

$\rho_w$ : peso específico da água;

$g$ : Aceleração gravitacional.

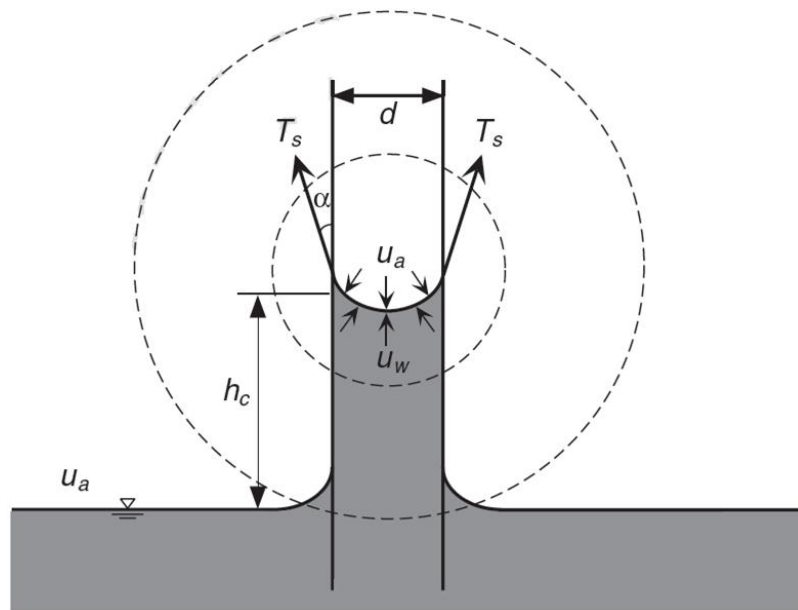


Figura 2.5. Equilíbrio mecânico de aumento capilar em tubo de pequeno diâmetro (LU e LIKOS, 2004).

Segundo Lu e Likos (2004), os mecanismos físicos e físico-químicos responsáveis pela sucção do solo durante um processo de umedecimento e secagem são variáveis, apresentando altos valores de sucção para baixos teores de umidade e baixos valores de sucção para altos teores de umidade, sendo esta variação comum aos diferentes tipos de solo e seu entendimento é fundamental quando do estudo de solos não saturados.

De acordo com Fredlund e Xing (1994), esta variação se deve à relação existente entre o teor de umidade e sucção nos solos, e sua distribuição é conhecida como curva de retenção de umidade dos solos (*CRUS*) ou curva característica. O teor de umidade define a quantidade de água contida no interior dos poros dos solos, sendo expressa em índices de volume ( $\theta$ ) ou peso ( $w$ ) conforme a Equação 2.7:

$$\theta = \frac{V_w}{V};$$

ou

$$w = \frac{M_w}{M_s} \cdot 100 \quad (\text{Eq. - 2.7})$$

Onde:

$V_w$  = Índice de volume de água;

$V$  = Volume total de solo;

$M_w$  = Massa de água;

$M_s$  = Massa dos sólidos do solo.

O comportamento da *CRUS* depende do tipo de solo analisado, pois é influenciada pelas propriedades do material, como: distribuição do tamanho dos poros, distribuição granulométrica, densidade, teor de matéria orgânica, teor de argila e mineralogia (LU e LIKOS, 2004). Fredlund e Xing (1994) observam que o histórico de tensões também influencia no comportamento da *CRUS*. A Figura 2.6 ilustra o comportamento típico da *CRUS* para os diferentes tipos de solos.

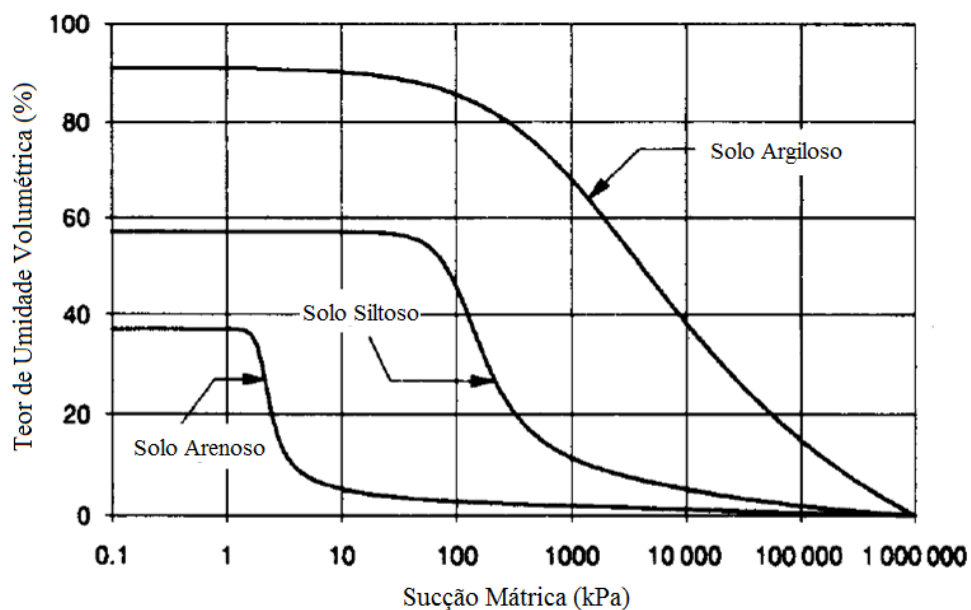


Figura 2.6. Curva característica típica de solo arenoso, siltoso e argiloso (Adaptado de FREDLUNG e XING, 1994).

Na Figura 2.7 é ilustrado a *CRUS* traçada durante um processo de secagem (*dessorção*) e umedecimento (*adsorção*) de um solo siltoso. Nela é possível observar seu formato típico e fatores que influenciam em comportamento.



Pontos como pressão de entrada de ar, teor de umidade residual ( $\theta_r$ ), e histerese são características típicas presentes na *CRUS*.

A *pressão de entrada de ar* se refere ao valor de sucção necessária para o início de entrada de ar, sendo mais elevado quanto maior é o teor de argilo minerais. Empiricamente, o *teor de umidade residual* corresponde ao teor de umidade onde a maior mudança de sucção é requerida para remoção adicional de água no solo (FREDLUNG e XING, 1994).

Sendo este solo umedecido (*adsorção*) observa-se que a trajetória da curva toma um caminho diferente devido ao fenômeno da histerese, comum aos diferentes tipos de solos e provocada por fatores como uniformidade na geometria dos grãos, variação do ângulo de contato da água com o solo durante a secagem e umedecimento e pelo aprisionamento de ar nos interstícios do solo (*ar ocluso*) (LU e LIKOS, 2004). Por esse motivo os teores de umidade da curva de umedecimento são inferiores aos da curva de secagem quando combinado a um determinado valor de sucção.

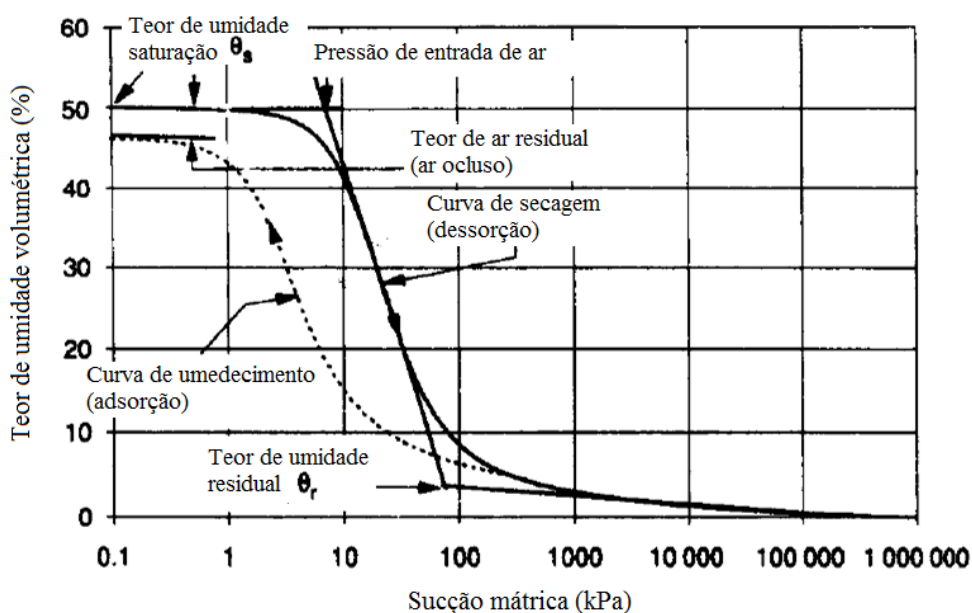


Figura 2.7. Curva característica típica de um solo siltoso (adaptado de FREDLUNG e XING, 1994).

Estudos realizados por Hahimi et al (2010), mostram que os parâmetros de ajuste da curva característica afetam a estabilidade de solos pobres em drenagem de forma mais significativa do que na estabilidade de taludes de solos com boa drenagem.

De acordo com Lu e Likos citados por Miqueletto (2007), os estudos das tensões em solos não saturados difere daquele desenvolvido para solos saturados ou secos. Sendo que nos

solos saturados a pressão da água atua diminuindo o contato entre os grãos e conseqüentemente reduzindo sua resistência ao cisalhamento, porém em solos não saturados a pressão da água é negativa, o que leva a uma maior aproximação entre os grãos e conseqüentemente ao aumento da resistência ao cisalhamento.

O estudo das tensões efetivas do solo inicialmente desenvolvido por Terzaghi não levava em consideração a parcela de sucção mátrica, o que a limitava apenas a solo saturados (Equação 2.8). Posteriormente Bishop propôs uma teoria baseado em Terzaghi, a qual acrescenta o parâmetro sucção mátrica, sendo este dependente do tipo de solo e do grau de saturação e variável de 0 a 1 quando da ausência de água ao estado saturado, respectivamente. Esta teoria de domínio geral possui o inconveniente de depender da função não linear do grau de saturação, do tipo e da história prévia de umedecimento e secagem do solo, ver Equação 2.9.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (\text{Eq. - 2.8})$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (\text{Eq. - 2.9})$$

Onde:  $\chi$  = parâmetro dependente do tipo de solo e do grau de saturação.

Ao analisarmos a resistência ao cisalhamento dos solos pela equação de Bishop através do critério de Mohr-Coulomb, Equação 2.10, podemos observar a projeção de uma superfície de ruptura com ângulo positivo ao aumento da sucção (Figura 2.8).

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a)_f + \chi(u_a - u_w)_f] \tan \phi' \quad (\text{Eq. - 2.10})$$

Sendo:  $c'$  = coesão efetiva;

$\phi'$  = ângulo de atrito efetivo.

Segundo Miqueletto (2007) outros autores como Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram uma equação com a mesma finalidade de determinar a resistência ao cisalhamento dos solos (Equação 2.11).

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (\text{Eq. - 2.11})$$

Onde:  $\phi^b$  = ângulo devido ao acréscimo de resistência provocado pelo aumento da sucção.

Porém ao compará-la com a (Eq. – 10) observamos uma equivalência se relacionarmos  $\tan\phi^b = \chi \tan\phi'$ . Segundo Campos (1997) citado por Miqueletto (2007) observa que a obtenção do parâmetro  $\phi^b$  é mais fácil do que a obtenção do parâmetro  $\chi$ , o que torna a equação desenvolvida por Fredlund e Morgenstern mais utilizada.

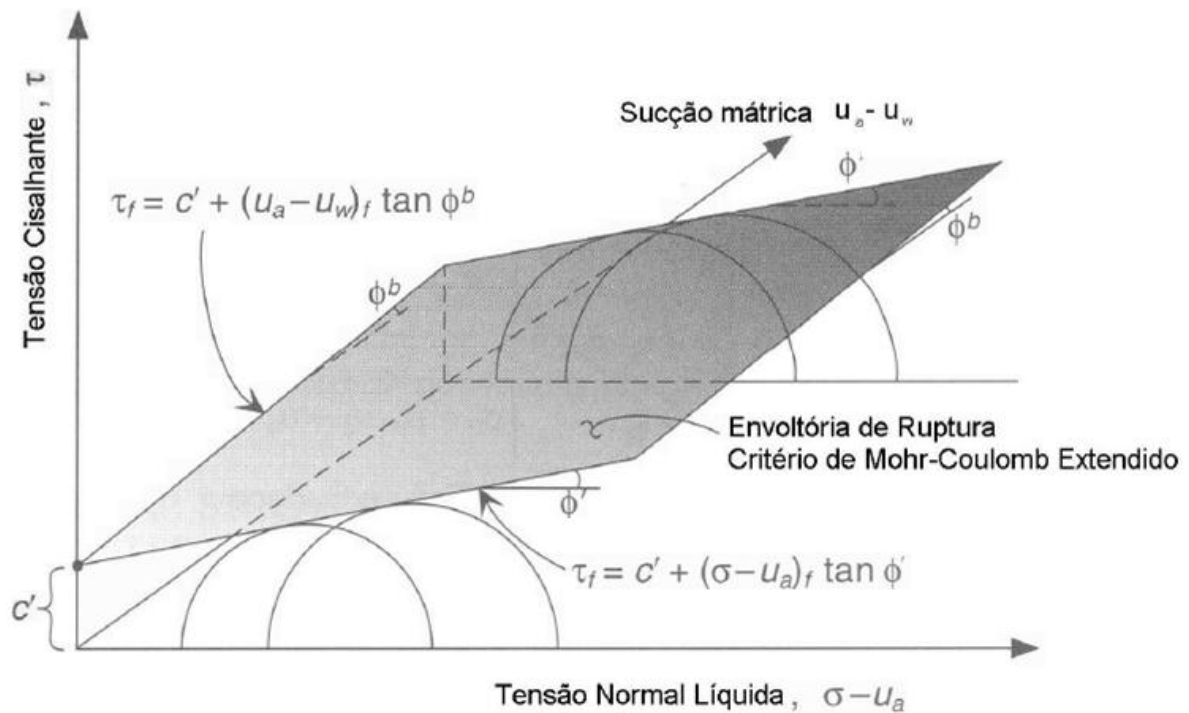


Figura 2.8. Superfície de ruptura influenciada pela sucção (adaptado de LU & LIKOS (1994), citado por MICHELETTTO (2007)).

Sendo os parâmetros ( $\phi^b$ ) e ( $\chi$ ) dependentes do grau de saturação o qual possui comportamento não linear a partir do ponto de pressão de entrada de ar, conforme visto na Figura 2.9, a projeção da superfície de cisalhamento se faz curva e não linear conforme observado na Figura 2.8.

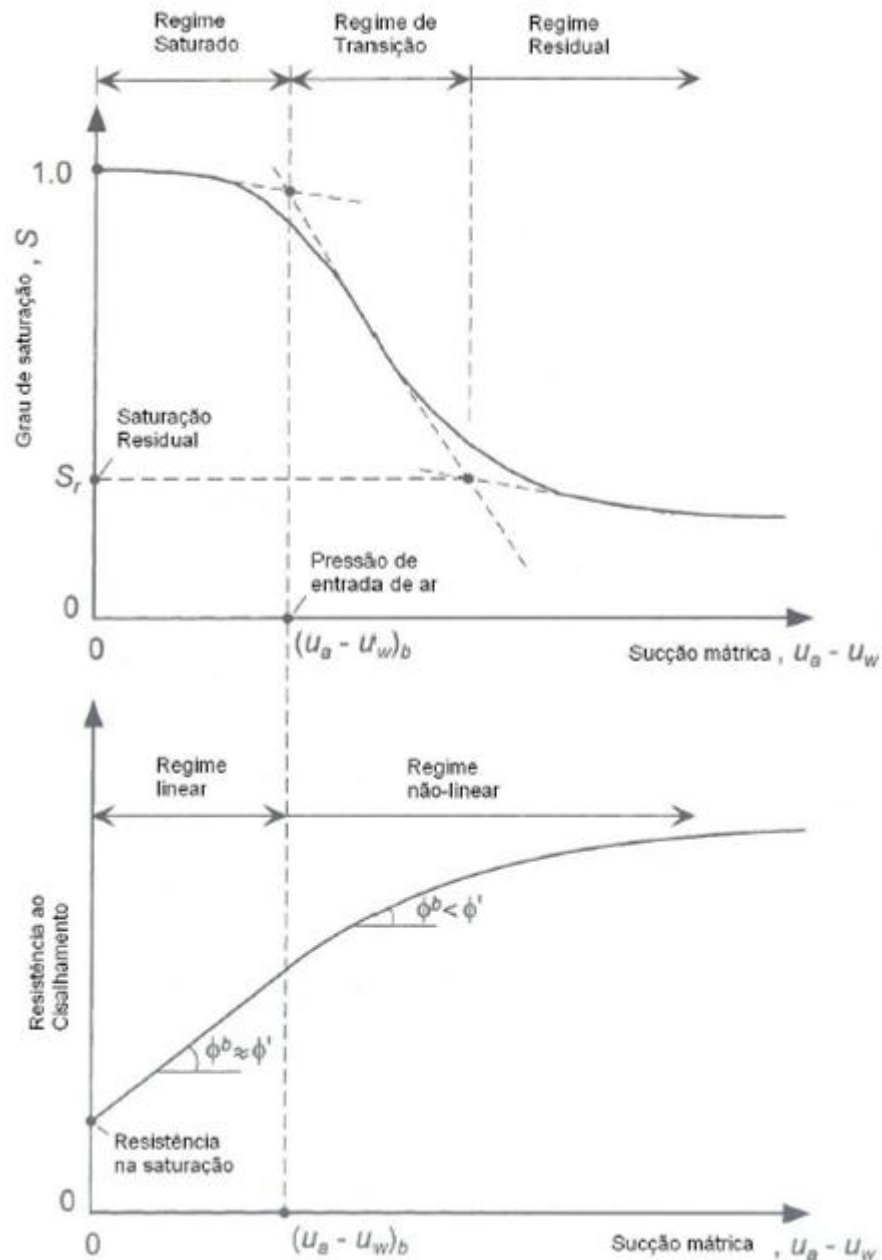


Figura 2.9. Não linearidade de  $\phi^b$  (adaptado de LU & LIKOS (1994), citado por MICHELETTO (2007)).

Diante do exposto é certo afirmar que os ciclos hidrológicos influenciam de forma significativa os fatores resistentes do solo, pois é durante este processo que o solo é submetido ao umedecimento quando da infiltração da água no solo e à secagem quando o mesmo passa pelas fases de redistribuição e drenagem da água.

## 2.2. Encostas naturais

Encostas naturais são tipos de relevo formados pelo processo de intemperismo e deposição diferencial ao longo de períodos geológicos. Caracterizam-se por superfícies inclinadas que unem áreas de diferentes altitudes. São diferenciadas pelos tipos de solo de sua formação e são bastante susceptíveis a deslizamentos. O solo das encostas naturais é formado pela ação do vento, sol e chuva sobre a rocha matriz. Diante do processo de intemperismo, dois tipos de solo podem ser formados: residuais e coluvionares (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Residuais são tipos de solo que permanecem no local de sua formação. Estão subdivididos em residuais maduros, relativamente homogêneos e que não possuem mais a estrutura da rocha mãe; solos saprolíticos, que possuem veios intrusivos, juntas preenchidas e baixa resistência à erosão; solos residuais jovens, que aparentam serem rochas, mas desmancham-se facilmente; e finalmente blocos em material inalterado, nos quais o intemperismo agiu nas zonas de menor resistência deixando intactos grandes blocos de rochas envolvidos por solo (MARCHESINI, 2007). Este tipo de solo apresenta variação em suas propriedades geotécnicas (físicas, hidráulicas e mecânicas) com o grau de intemperismo, o que repercute em seu comportamento em termos de engenharia (JESUS, 2008).

Solos coluvionares são depósitos compostos por blocos e/ou grãos de qualquer dimensão, transportados por gravidade e acumulados no sopé ou a pequena distância de taludes mais íngremes ou escarpas rochosas. De maneira geral, podem ser descritos como materiais de grande variabilidade de textura e com rede de fluxo bem estabelecida nos períodos chuvosos (LACERDA e SANDRONI, 1985, *apud* SILVEIRA, 2003).

### 2.2.1. Classificação dos tipos de deslizamentos

O termo deslizamento descreve uma ampla variedade de processos que resultam no movimento de encostas formadas por rochas, solos, aterros artificiais ou pela combinação deles. Esses materiais podem se mover por queda ou desprendimento, tombamento, escorregamento, espalhamento, rastejo e por corridas (USGS, 2009). Varnes (1978) descreve cada um desses processos, ilustrados nas Figuras 2.10 a 2.15.

#### 2.2.1.1. Queda ou Desprendimento

Este tipo de movimento começa com o destacamento de solo ou rocha a partir de uma encosta íngreme, ao longo de uma superfície na qual ocorre pouco ou nenhum deslocamento por cisalhamento.



Figura 2.10. Queda ou Desprendimento (USGS, 2009)

#### 2.2.1.2. Tombamento

É a rotação de massa de solo ou rocha em torno de um ponto sob a ação da gravidade e forças exercidas por unidades adjacentes.

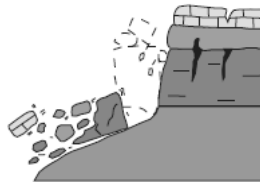


Figura 2.11. Tombamento (USGS, 2009)

#### 2.2.1.3. Escorregamento

É o movimento de uma massa de solo ou rocha ocorrendo em uma superfície de ruptura bem definida. Pode ser rotacional ou translacional. No escorregamento rotacional, a superfície de ruptura é uma curva com concavidade para cima e o movimento do escorregamento é uma rotação sobre um eixo paralelo a superfície e transversal ao escorregamento. No escorregamento translacional a superfície de ruptura é plana com pequena rotação ou inclinação para trás.

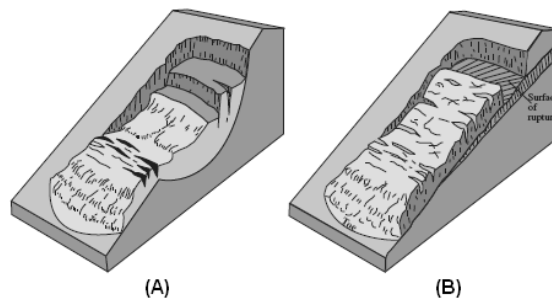


Figura 2.12. Escorregamento: (A) Rotacional; (B) Translacional (USGS, 2009)

#### 2.2.1.4. Espalhamento

Difere dos outros movimentos porque ocorre em encostas pouco inclinadas ou terrenos planos. O movimento dominante é lateral acompanhado por fraturas de cisalhamento ou tração. A falha é causada por liquefação, processo no qual solos não coesivos, fofos e saturados (geralmente areias e siltes) são transformados do estado sólido para o líquido.

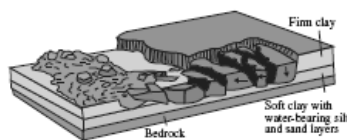


Figura 2.13. Espalhamento (USGS, 2009)

#### 2.2.1.5. Rastejo (*Creep*)

É um movimento lento e contínuo de um talude de solo ou rocha. É causado por uma tensão de cisalhamento suficiente para produzir deformação permanente, porém pequena para produzir falhas.

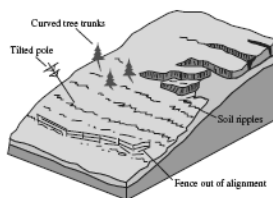


Figura 2.14. Rastejo (USGS, 2009)

#### 2.2.1.6. Corridas

Existem alguns tipos básicos de corridas. Corridas de detritos, que é um movimento rápido no qual uma combinação de solo fofo, rocha, matéria orgânica, ar e água se mobilizam como uma lama que flui da encosta e são causadas pelo intenso fluxo de águas superficiais devido a fortes chuvas. Corridas de terra, onde o solo se liquefaz e desce pelo talude, formando uma depressão na crista, são causados pelo encharcamento do solo por chuvas pesadas ou longos períodos de chuvas de menor intensidade. Corridas de lama são como as corridas de terra com material (argila mole) que é encharcado o suficiente para fluir rapidamente.

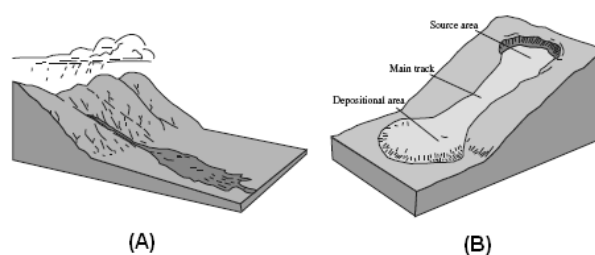


Figura 2.15. Corridas: (A) de detritos; (B) de terra (USGS, 2009)

Em muitos casos são observadas combinações de mecanismos, configurando um evento complexo. Neste caso, uma movimentação inicial, numa certa categoria, pode ser seguida por um outro tipo de movimento, e ainda outro. Para exemplificar, pode-se supor que um tombamento seja seguido por uma queda, cujo impacto, numa encosta de solo provoque uma corrida de detritos (AGUIAR *et al.*, 2005).

Os vários tipos de deslizamentos podem ser diferenciados pelo tipo de movimento e pelo tipo de material envolvido. Varnes (1978) classificou esses tipos de deslizamentos, que são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Tipos de deslizamentos (Adaptado de Varnes, 1978)

TIPO DE MOVIMENTO		TIPO DE MATERIAL	
		MACIÇO ROCHOSO	SOLOS
			Predominantemente granular      Predominantemente fino
QUEDA OU DESPRENDIMENTO		Queda de blocos de rocha	Queda de detritos      Queda de solo
TOMBAMENTO		Tombamento de blocos de rocha	Tombamento de detritos      Tombamento de terra
ESCORREGAMENTO	Rotacional	Deslizamento de rocha	Deslizamento de detritos      Deslizamento de detritos
	Translacional		
ESPALHAMENTO LATERAL		Espalhamento de rocha	Espalhamento de detritos      Espalhamento de terra
CORRIDAS		Corridas de rocha	Corridas de detritos      Corridas de lama
COMPLEXO		Combinação de dois ou mais tipos principais de movimento	

### 2.2.2. Monitoramento de Encostas

O monitoramento de encostas possui fundamental importância na tomada de decisões quando da análise de áreas em processo de deslizamento ou susceptíveis ao mesmo, pois a maioria destas áreas exibe sintomas de deslizamentos passados, possíveis de serem



identificados pelo campo de instrumentação, em tempo anterior à implantação do projeto (SOWERS e ROYSTER, 1978).

A instrumentação de obras em áreas de risco significa sistematizar as observações sobre o comportamento das mesmas (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

É uma prática que cresce em importância nos dias atuais, devido ao porte das obras e muitas vezes pela localização em relação a comunidades e áreas de significância ambiental. Isso provoca uma necessidade de acompanhamento contínuo *in situ* das diversas variáveis determinadas no projeto, para verificar possíveis discrepâncias entre os valores previstos e reais, ou identificar fenômenos que possam provocar a instabilidade do objeto em observação, seja este uma obra ou uma área de encostas naturais (AGUIAR *et al.*, 2005).

Reconhece-se que o principal mecanismo de instabilização das encostas não saturadas é a ocorrência da infiltração da água no solo, a qual está associada a precipitação pluviométrica, possibilitando a formação da frente de umedecimento, gerando a redução da coesão efetiva do solo e consequentemente a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo (JESUS *et al.*, 2006). Portanto, monitorar o processo de infiltração da água e o nível de água no solo torna-se de grande relevância para os estudos de processos de instabilização.

Outra parte significativa da instrumentação existente se baseia no controle de movimentação do talude. Pode-se dizer que somente em casos raros a ruptura de um talude ocorre de maneira brusca sem que tenham surgidos indícios de instabilidade. Na maioria dos casos, surgirão fendas de tração ou cisalhamento na borda da área instável e irão aparecer deslocamentos e deformações em pontos situados no interior da própria área. Dessa forma, uma vez que o processo de instabilização do terreno se inicie, quanto antes for feita a percepção da movimentação, melhores serão as ações corretivas que podem ser tomadas para impedir danos às estruturas, consegue-se isto através do monitoramento dos deslizamentos de encostas (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

### 2.2.3. Tipos de instrumentação disponível

Os instrumentos comumente utilizados para o controle do nível de água e da poro-pressão em uma encosta são os piezômetros e medidores de nível de água (AGUIAR *et al.*, 2005); para o monitoramento da infiltração da água (frente de umedecimento), que faz variar a sucção no solo, são utilizados medidores de umidade (SOARES, 2006) e tensiômetros (JESUS, 2008); para o monitoramento do deslocamento são utilizados inclinômetros e extensômetros (AGUIAR *et al.*, 2005).

Deformação e poro-pressão são os primeiros parâmetros que auxiliarão a avaliar a estabilidade de um talude. Medidas de deformação são geralmente de interesse primário, porém poro-pressões elevadas podem causar deformação, por isso medidas de poro-pressão são também necessárias (DUNNICLIFF, 1988).

#### 2.2.3.1. Princípio de funcionamento

De acordo com Dunnicliff (1988), a maioria dos sistemas de instrumentação, inclusive aqueles utilizados em geotecnia, consistem em um transdutor, um sistema de aquisição de dados e um sistema de comunicação entre os dois. Um transdutor é um dispositivo que converte uma mudança física em um correspondente sinal de saída. Os sistemas de aquisição de dados variam desde unidades portáteis de leitura até sistemas automáticos complexos. Os tipos de transdutores mais utilizados na geotecnia são os mecânicos, elétricos, de corda vibrante, hidráulicos e pneumáticos.

Os instrumentos automáticos utilizam sensores ou transdutores para realizar as medições. Estes são os elementos que captam variações físicas e convertem-nas em sinais e impulsos elétricos. Sistemas resistivos necessitam de circuito auxiliar de condicionamento que permita converter a mudança de resistência elétrica (decorrente de uma variação do meio), em uma tensão proporcional medida em Volts. Tais circuitos, chamados pontes extensométricas, são baseados no princípio de equilíbrio de tensão das pontes resistivas de *Wheatstone*.

A ponte de *Wheatstone* é uma malha de resistores energizados por uma fonte de tensão  $V$  que fornece uma leitura de saída não nula  $E$ .

A ponte é ativada através da aplicação de uma tensão de alimentação estabilizada ou através de um sinal de tensão alternada de alta frequência. O emprego de uma tensão de alimentação modulada em frequência minimiza a influência de ruídos na leitura da voltagem que é proporcional à deformação, exigindo, contudo, um dispendioso circuito de modulação e comparação de fase dos sinais elétricos de referência de operação da ponte.

Sensores com princípio resistivo podem ser usados diretamente na avaliação de deformações superficiais ou em diversos sistemas mecânicos, compondo assim, transdutores para grandezas como: pressão, força, aceleração, etc.

O sistema indutivo, baseado em indução magnética, tem como principal sensor o LVDT (Transformador Diferencial de Variação Linear). Este sensor consiste de uma série de indutores inseridos em uma haste cilíndrica oca e um núcleo cilíndrico sólido. O LVDT produz um sinal elétrico de saída proporcional à posição do núcleo. Pode ser usado em muitos tipos diferentes de dispositivos de medidas que precisam converter variações de posições

físicas em sinais elétricos de saída. A perda de fricção entre a cavidade oca e o núcleo prolonga a vida do LVDT e gera uma ótima resolução. A pequena massa do núcleo permite uma boa sensibilidade em testes dinâmicos (OMEGA ENGINEERING, 2002).

O transformador linear variável possui três enrolamentos, sendo que o primário é alimentado por uma tensão. O deslocamento é dado pela variação da voltagem,  $V_0 = V_1 - V_2$ , sendo esta induzida pelo deslocamento do núcleo (Figura 2.16).

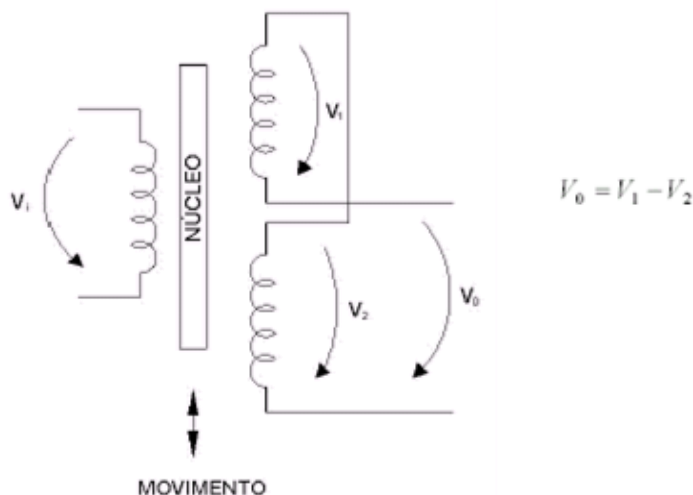


Figura 2.16. Representação do funcionamento de um LVDT (OMEGA ENGINEERING, 2002).

O Sistema de Corda Vibrante (*Vibrating Wire*) é usado nos instrumentos para aplicações geotécnicas, porque fornece credibilidade para um longo período, desvio mínimo zero e imunidade do sinal a interferências elétricas, o que é de importância primordial.

O princípio de operação do sensor de corda vibrante é a frequência de vibração de uma corda estendida num corpo de uma estrutura que se deforma com a grandeza a ser medida. Um determinado comprimento de corda de aço resistente à elevada tensão é firmemente preso em suas pontas, assim ela estará livre para vibrar em sua frequência natural.

Como uma corda de violão, a frequência de vibração varia com a tensão na corda e com o movimento relativo entre os dois blocos. A corda possui uma bobina elétrica (*Plucking Coil*) colocada em seu ponto médio. A vibração na corda induz na “bobina de arranque” uma corrente alternada de frequência idêntica à frequência de vibração da corda. O sinal da frequência pode ser transmitido ao longo de cabos condutores e visualizado por um leitor portátil (*Readout*) ou monitorado por um sistema de aquisição de dados (CHOQUET e JUNEAU, 2003).

Podem ser apontadas as seguintes vantagens e desvantagens na utilização dos sistemas elétricos (resistivo e indutivo) e de corda vibrante. Como vantagens, são citadas a sua alta resolução e precisão, resposta rápida, sinais podem ser transmitidos a longa distância, facilidade de instalação, possibilidade de automação das leituras. E, como desvantagens, são citadas o seu custo elevado em relação a sistemas mecânicos e a possibilidade de serem danificados por descarga elétrica (OSAKO, 2002).

### 2.3. Tecnologia de Fibra Ótica

A fibra ótica consiste em um cilindro de vidro envolto por um número de camadas de vidros dispostos como anéis concêntricos, que apresentam diferentes densidades, permitindo assim que a energia eletromagnética (luz) emitida viaje confinada no interior de um núcleo até a extremidade oposta ou um receptor.

A luz viaja com velocidades diferentes em meios com densidades diferentes, sempre reduzindo sua velocidade quanto maior for sua densidade. Sua direção é alterada quando entra em contato com outro meio em função dos efeitos físicos de reflexão, refração e difração (BAILEY e WRIGHT, 2003).

Conhecendo a velocidade do meio é possível determinar seu índice de refração ( $n_x$ ) que é a relação entre a velocidade da luz no vácuo ( $v_0$ ) e a velocidade da luz no meio ( $v_x$ ), (Equação 2.12).

$$n_x = \frac{c_0}{v_x} \quad (\text{Eq - 2.12})$$

Sendo assim, quanto maior o índice de refração do meio, maior será sua densidade e conseqüentemente menor a velocidade de propagação da luz. A Tabela 2.2 apresenta valores de índices de refração para diferentes meios.

Tabela 2.2. Índice de refração para os diferentes meios ( $\lambda = 589\text{nm}$ ) (AUFLEGER, 2000)

Meio	Velocidade da luz ( $v$ ) (m/s)	Índice de refração ( $n_x$ )
Vácuo	299792456,2	1,000
Ar	299711534,0	1,00027
Água	$2,249.10^8$	1,333
Sal (NaCl)	$1,999.10^8$	1,500
Diamante	$1,239.10^8$	2,419
Silício	$2,056.10^8$	1,458

De acordo com Bailey e Wright (2003), quando um raio de luz interage com outro meio, o mesmo é refletido e/ou refratado dependendo do seu ângulo de incidência ( $\theta_i$ ) e das mudanças do índice de refração. Se o raio de luz passa de um meio com índice de refração menor que do outro, seu ângulo de incidência será menor do que o refratado ( $\theta_{refr}$ ) e vice-versa, até o momento em que o raio de luz refratado forma um ângulo de  $90^\circ$  com a normal da interface, ou seja, ser direcionado paralelo à mesma. Este se refere ao ângulo crítico de incidência ( $\theta_c$ ), portanto os raios de luz incididos com ângulos maiores do que o ângulo crítico serão totalmente refletidos (Figura 2.17). A partir deste momento, os ângulos incididos são iguais aos ângulos refletidos.

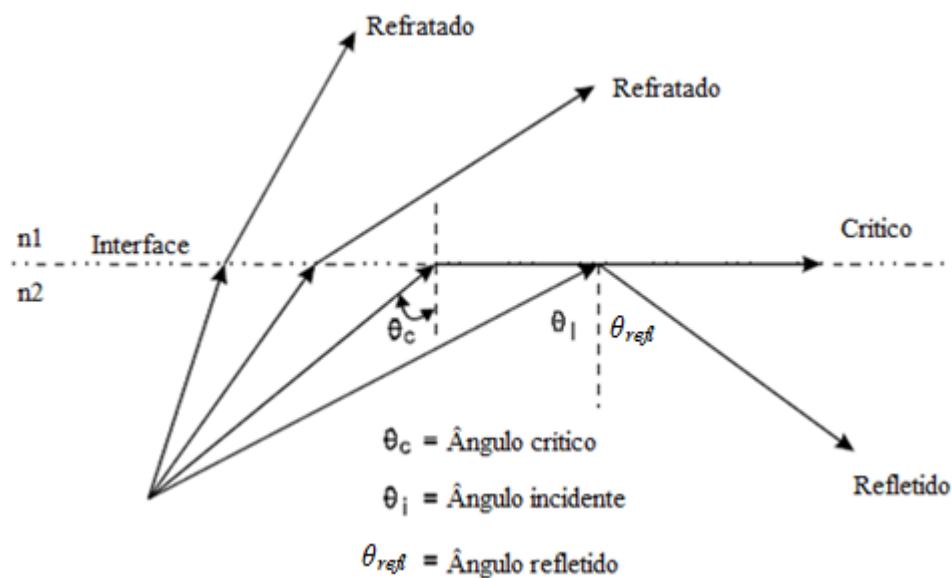


Figura 2.17. Comportamento dos raios de luz incididos em meios com diferentes índices de refração (adaptado de Bailey e Wright, 2003).

O ângulo crítico é determinado pela Equação 2.13:

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_1}{n_2} \quad (\text{Eq. - 2.13})$$

Dessa forma, ao se analisar a Figura 2.18, que demonstra o perfil típico de uma fibra ótica, pode-se então entender como é possível a luz ser transmitida de um extremo ao outro. Sendo o núcleo constituído de um material com índice de refração (1,48) menor do que o presente no revestimento primário (1,49), a luz que incide com um ângulo maior que o ângulo crítico em seu interior será confinada e refletida totalmente em seu interior.

As características geométricas da fibra costumam se diferenciar apenas com relação ao diâmetro do núcleo, sendo que o revestimento primário e a camada protetora geralmente apresentam os diâmetros de 125  $\mu\text{m}$  e 250 ou 900  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

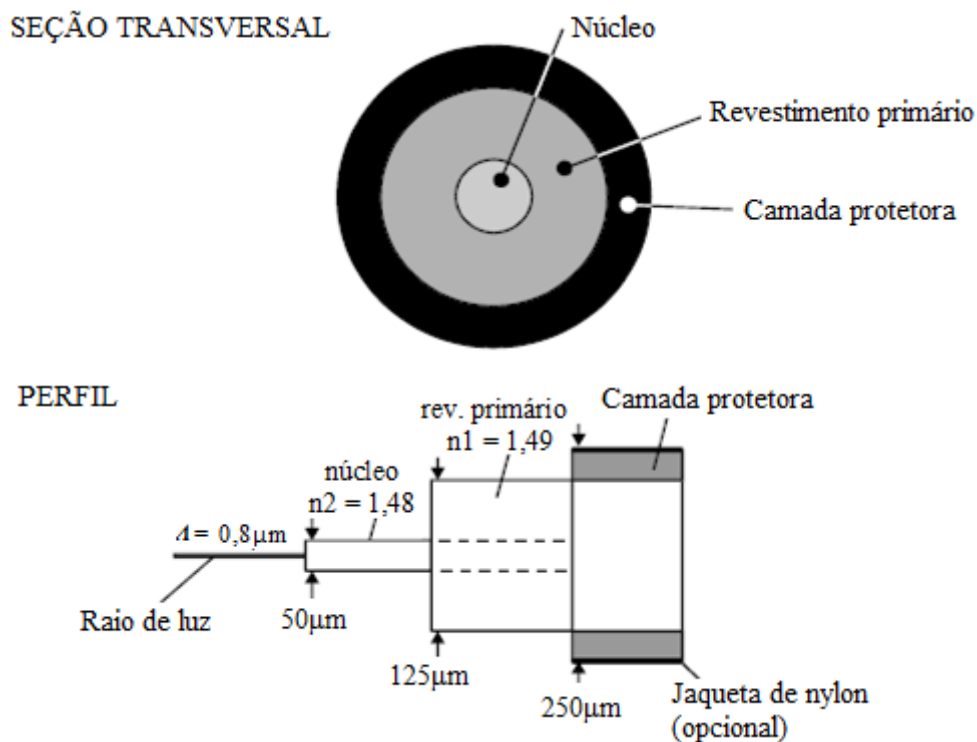


Figura 2.18. Perfil típico de uma fibra ótica (adaptado de Bailey e Wright, 2003)

Segundo Bailey e Wright (2003), o diâmetro do núcleo varia para os diferentes tipos de fibras presentes no mercado, as quais são classificadas pelo número de modos em Mono-modos e Multi-modos, conforme Tabela 2.3 e Figura 2.19.

Tabela 2.3. Classificação dos diferentes tipos de fibra (do autor, 2011).

Tipo	Diâmetro (µm)				Observação
	Núcleo	Revestimento primário	Camada protetora		
Multi-modo	50	125	250	900	Europa
	62,5	125	250	900	EUA/Austrália/Ásia
Mono-modo	8 / 10	125	250	900	Padrão Internacional

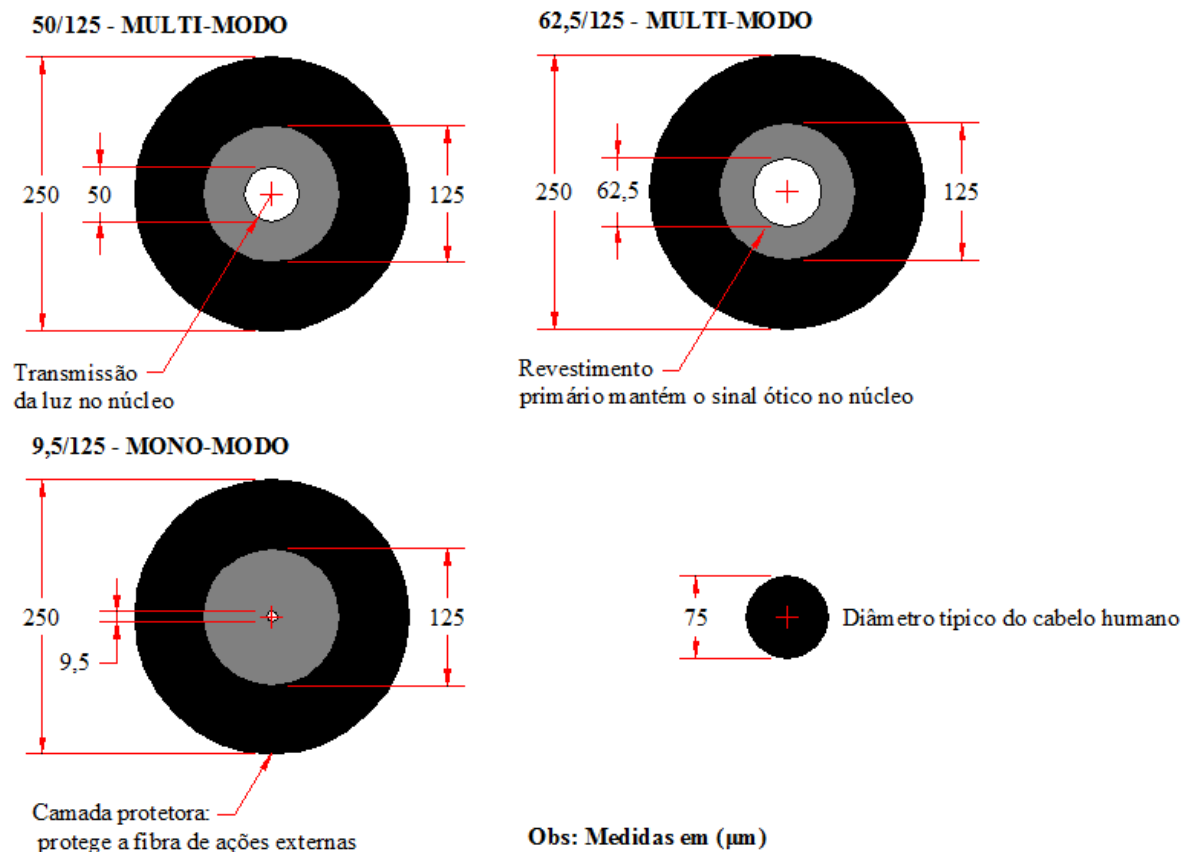


Figura 2.19. Seções transversais dos diferentes tipos de fibras ópticas (adaptado de FURUKAWA, 2010).

Quando se comparam as diferentes fibras, pode-se observar diferenças não apenas em seus diâmetros, mas também em fatores como abertura numérica ( $NA$ ), perfil do índice de refração, e número de modos.

Bailey e Wright (2003) observam que toda a fibra possui um ângulo de aceitação da luz incidente, projetado entre o contato fonte de luz e fibra ótica, que limita o ângulo de aceitação da luz ( $\theta_l$ ) na fibra, sendo que na fibra cilíndrica haverá a projeção de um cone de aceitação (Figura 2.20). Desta forma, toda luz, ao entrar na fibra com ângulo superior a  $\theta_l$ , será parcial ou totalmente refratada. A medida utilizada para especificar a habilidade da fibra em coletar a luz incidente sem que a mesma seja refratada é chamada de abertura numérica, a qual pode ser determinada pelo ângulo de aceitação ou como um fator dos índices de refração da fibra, de acordo com a Equação 2.14.

$$NA = \sin\theta_1$$

ou

$$NA = \sqrt{(n_2^2 - n_1^2)} \quad (\text{Eq. - 2.14})$$

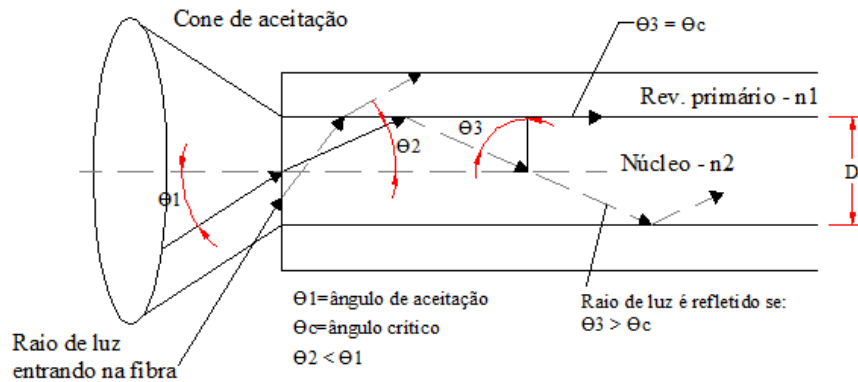


Figura 2.20. Cone de aceitação de uma fibra óptica (adaptado de Bailey e Wright, 2003)

A forma com que o raio é refletido no interior do núcleo dependerá da variação gradual da densidade do núcleo ao encontro do revestimento primário. Sendo ele constante o perfil do índice de refração será homogêneo, chamado de índice constante (IC), sendo ele gradual o perfil será variável crescente da interface ao centro, chamado de índice gradual (IG), conforme pode ser observado na Figura 2.21.

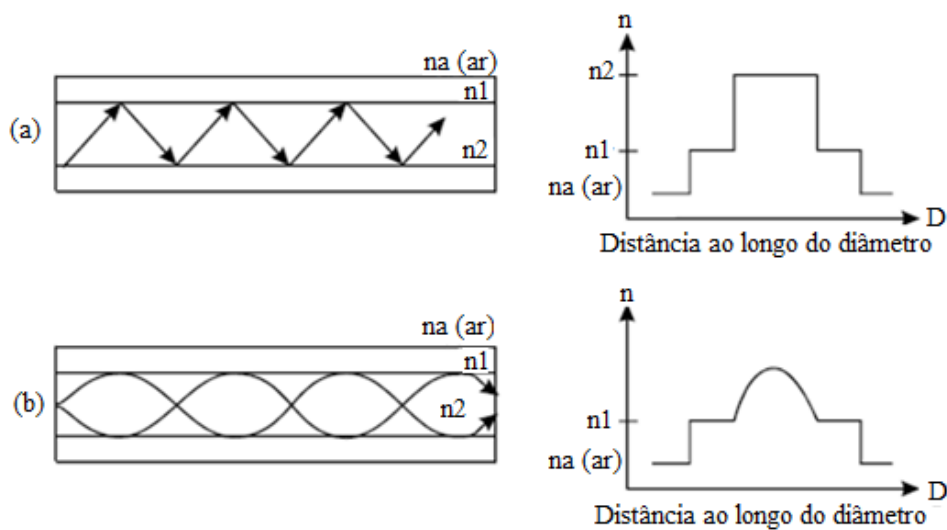


Figura 2.21. Perfil do índice de refração, (a) homogêneo; (b) variável (Adaptado de Bailey e Wright, 2003)

O número de modo corresponde a quantidade de feixes de luz inseridos no interior do núcleo da fibra e é dependente do seu diâmetro ( $D$ ), abertura numérica ( $NA$ ) e do comprimento de onda da luz irradiada ( $\lambda_l$ ). Para fibras que apresentam o perfil do índice de refração homogêneo, o número de modos pode ser calculado seguindo a Equação 2.15.

$$M = \frac{0,5.D.NA^2}{\lambda_l} \quad (\text{Eq. - 2.15})$$



Diferenciadas das fibras multi-modo, que permitem vários modos serem inseridos a partir de um pulso de luz, as fibras mono-modo permitem apenas a entrada de um modo fundamental, não apenas por causa da redução do diâmetro do núcleo, mas sim porque em sua fabricação propositalmente se introduz uma diferença muito pequena entre o índice de refração do núcleo e do revestimento primário, o que acarreta um aumento do ângulo crítico e, conseqüentemente, na limitação do número de modos. A Figura 2.22 nos mostra que o número de modos é determinado não apenas pela variação do diâmetro, mas também pela abertura numérica.

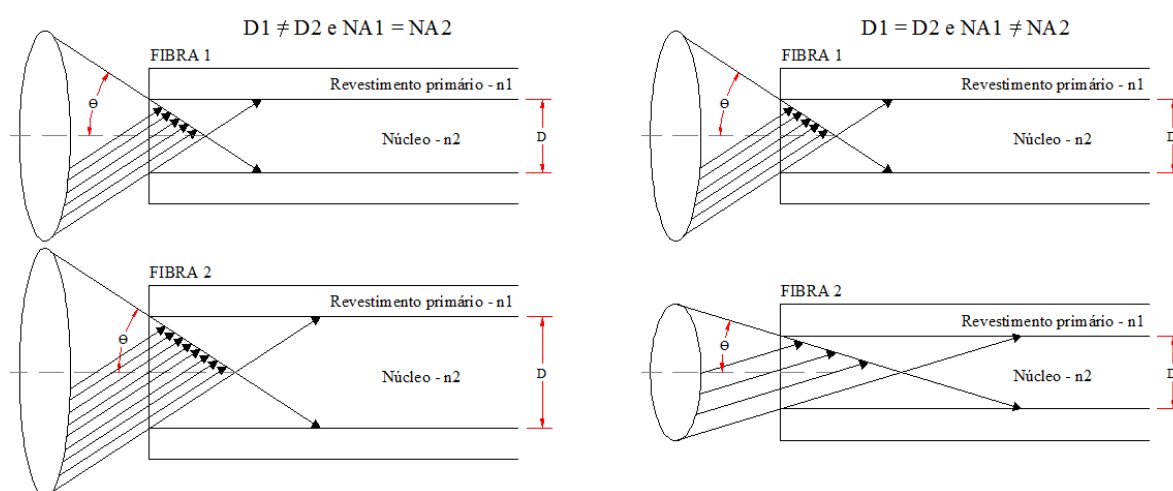


Figura 2.22. Características dos diferentes tipos de fibra (adaptado de Bailey e Wright, 2003).

O princípio fundamental de operação das fibras mono-modo se baseia no fato de que para se reduzir o número de modos (e conseqüentemente reduzir a dispersão de modo) que viajam no interior do núcleo, o diâmetro do núcleo e/ou a abertura numérica devem ser reduzidos, e/ou o comprimento de onda de transmissão deve ser aumentado (BAILEY e WRIGHT, 2003). Por este motivo apresentam uma atenuação do sinal ótico menor do que os presentes nos diferentes tipos de fibras multi-modo, o que possibilita leitura em distâncias maiores. A abertura numérica é extremamente pequena, de 0,1 a 0,15, sendo a das fibras multi-modo de 0,2 a 0,290. A maioria das fibras mono-modo operam com comprimentos de onda de 1300nm e 1550nm, já as fibras multi-modo operam com 850nm e/ou 1300nm. A densidade do núcleo é sempre constante (*IC*), já as fibras multi-modo podem apresentar também núcleo com densidade gradual (*IG*). A Figura 2.23 correlaciona a taxa de dados com as distâncias de transmissão para os diferentes tipos de fibra em seus diferentes comprimentos de ondas originados pelos diferentes equipamentos.

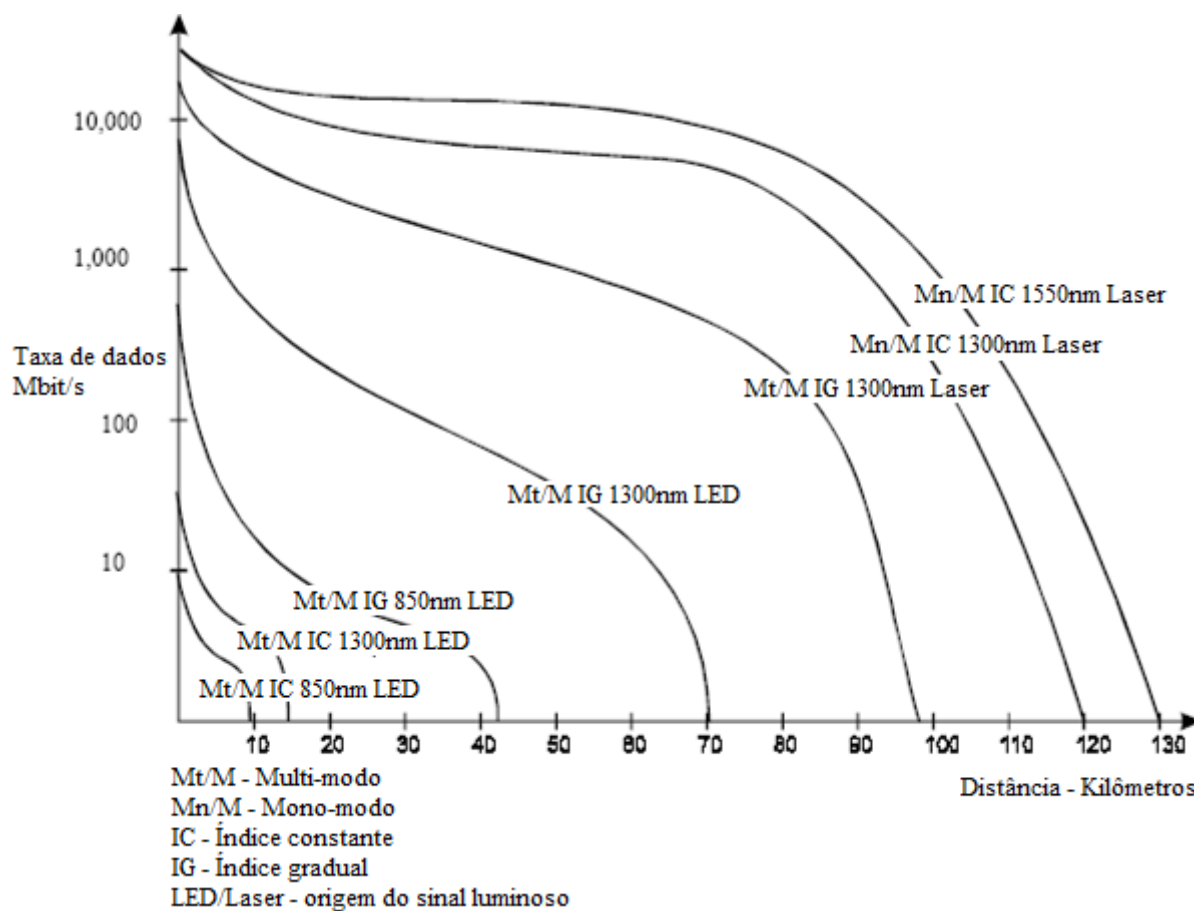


Figura 2.23. Comparação da taxa de dados, distância, tipo de fibra e tipo de equipamento que origina o sinal luminoso (Adaptado de Bailey e Wright, 2003).

Como todo tipo de energia, a luz sofre um decréscimo em sua amplitude devido à sua resistência com o meio físico. Segundo Bailey e Wright (2003), este efeito é conhecido como atenuação de sinal. A unidade de medida utilizada é o decibel (dB), e pode ocorrer intrínseca ou extrinsecamente à fibra.

Conforme Hoepffner (2008), as atenuações intrínsecas se devem às interações da luz com as propriedades do núcleo e são dependentes da variação da estrutura e do comprimento de onda, ou pela absorção do material devido à presença de impurezas. Já as atenuações extrínsecas são devidas às macro deformações provocadas por fatores externos, ou micro deformações observadas na interface núcleo e revestimento primário. Outra forma de atenuação é decorrente das conexões realizadas com o objetivo de unir dois extremos de fibra, seja pela necessidade de, por exemplo, se prolongar um trecho já instalado ou reparar um trecho rompido.

Segundo Furukawa (2010) as atenuações das conexões são provocadas por fatores como: incompatibilidade do diâmetro do núcleo, incompatibilidade do diâmetro do

revestimento primário, incompatibilidade da abertura numérica, concentricidade do núcleo, núcleos não circulares e desalinhamento dos núcleos (Figura 2.24).

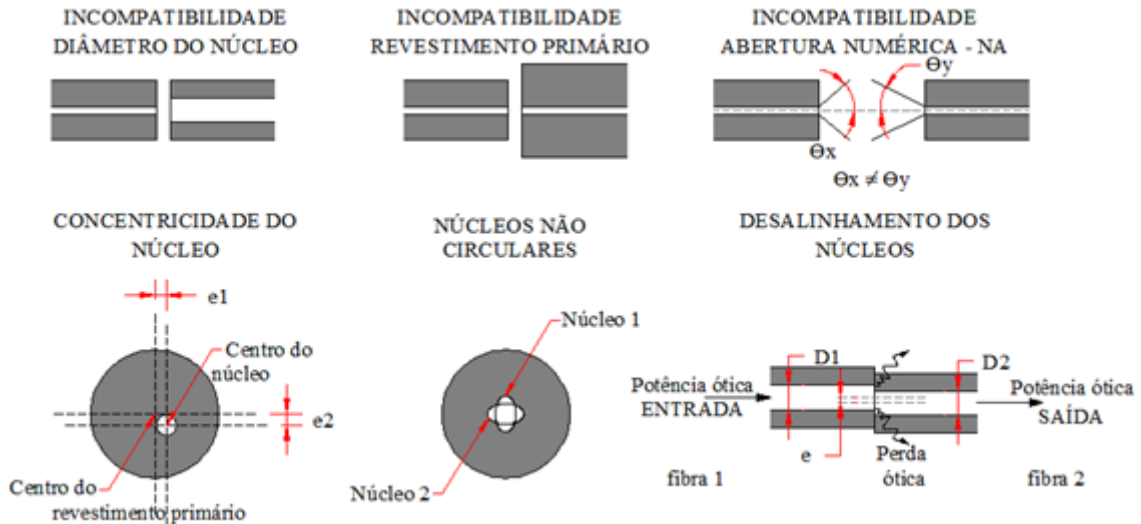


Figura 2.24. Fatores que causam atenuação óptica por conexão (Adaptado de FURUKAWA, 2010).

O valor da atenuação óptica pode ser determinado pela Equação 2.16. A qual não leva em consideração fatores intrínsecos ou extrínsecos.

$$\text{Perda ótica} = 10. \log_{10} \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = 10. \log_{10} \left[ \left( \frac{2D_1 D_2}{D_1^2 + D_2^2} \right)^2 \text{EXP} \left( \frac{2e^2}{D_1^2 + D_2^2} \right) \right] \quad (\text{Eq. - 2.16})$$

### 2.3.1. Medidas distribuídas de temperatura com base em tecnologia de fibra ótica

A técnica de medição distribuída de temperatura com fibra ótica conhecida como *Distributed Fiber Optics Temperature* – “DFOT”, ou como *Distributed Temperature Sensor* – “DTS”, se baseia nas propriedades de sensibilidade térmica da fibra onde ela mesma é o sensor (AUFLEGER et al, 2008).

O pulso de luz projetado no interior do núcleo da fibra possui uma duração ( $t_x$ ) de 10 nanosegundos ou menos e se desloca ao longo de todo o seu comprimento (SMOLEN e SPEK, 2003).

Ao se deslocar, o pulso de luz colide com a estrutura atômica da fibra provocando o retro espelhamento de dois tipos de radiação de volta ao início da fibra, possibilitando assim sua análise através de equipamento específico. A maior parte da radiação retro espelhada ocorre em função das flutuações naturais de densidade do núcleo da fibra e é conhecida como

retro espelhamento de Rayleigh, muito utilizada para a calibração do sistema. A radiação restante é conhecida como retro espelhamento de Raman, a qual é influenciada pela transição de energia vibracional causada pelas mudanças de temperatura presente no meio em que a fibra está em contato (SENSORNET, 2009). Quando a energia original do pulso ótico é reduzida, picos de Stokes são observados quando são aumentados os picos de Anti-Stokes são influenciados. A determinação da temperatura é baseada na relação entre anti-stokes e Stokes. A Figura 2.25 caracteriza o espectro da luz retro espelhado, onde estão presentes os picos de Rayleigh, Brillouin e Raman.

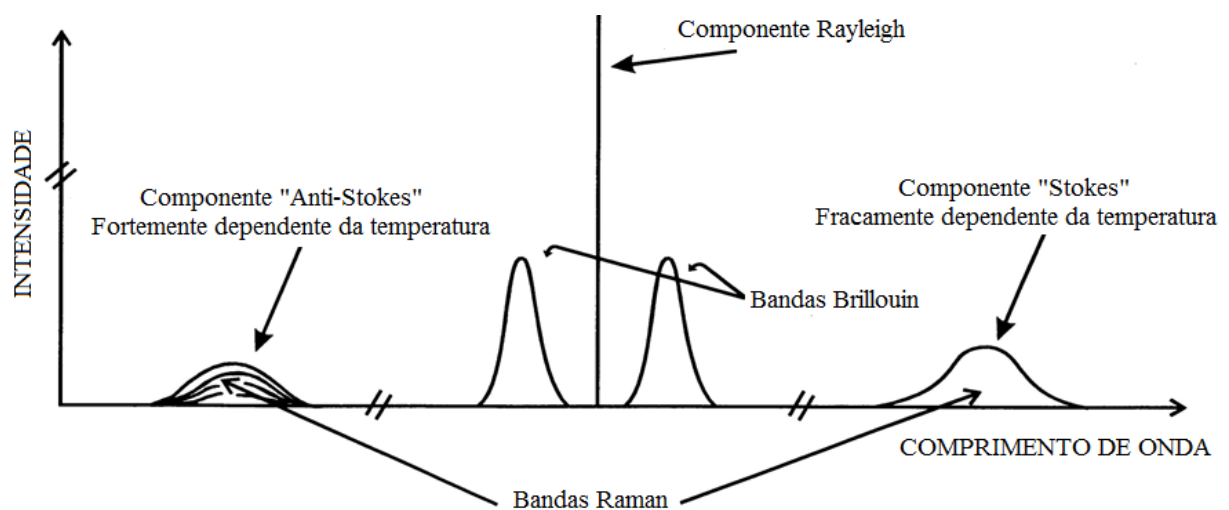


Figura 2.25. Espectro da luz retro espelhada (adaptado de Smolen e Spek, 2003).

Utilizando a (Eq. – 2.12) têm-se o conhecimento da velocidade da luz projetada no interior do núcleo da fibra. Ao ser determinada juntamente com a locação ou comprimento da fibra, é possível determinar o posicionamento da anomalia, pois o sinal retro espelhado percorre o mesmo caminho de volta.

A resolução espacial dessa técnica se limita ao tempo de duração de lançamento ou projeção do pulso de luz que é em torno de 10 nanosegundos. Isso gera um pulso de luz com comprimento ( $L_{pl}$ ) determinado pela Equação 2.17. Este pulso pode ser caracterizado como um sensor móvel que manda informações de temperatura por todo o comprimento da fibra, Figura 2.26

$$L_{pl} = \frac{c_0}{n_x} \cdot t_x \quad (\text{Eq. - 2.17})$$

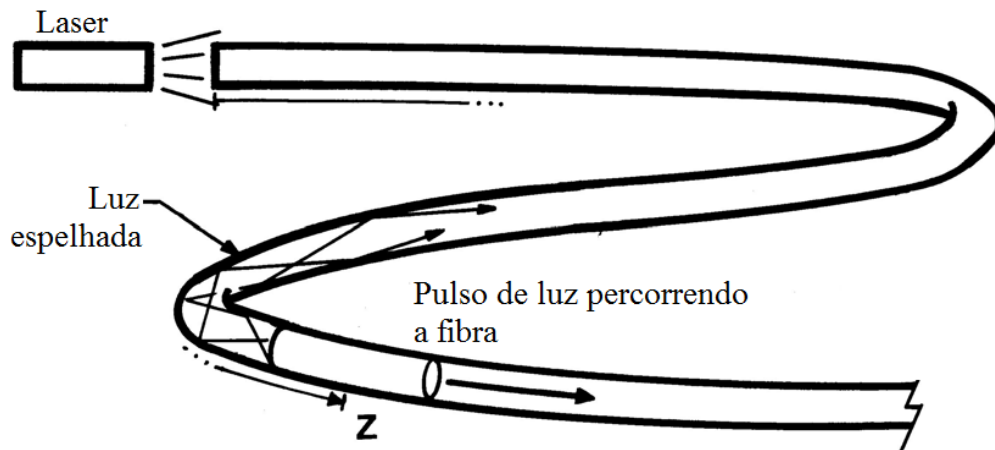


Figura 2.26. Luz sendo retro espelhada para o equipamento de projeção (Adaptado de Smolen e Spek, 2003).

Esta resolução é dependente do tempo em que o sistema leva para detectar completamente uma variação ou mudança de temperatura (SMOLEN e SPEK, 2003). A Figura 2.27 representa um pulso de luz com comprimento de 2 m sendo analisado em intervalos de 2,5 nanosegundos, e que está sendo influenciado por uma anomalia de 10°C aplicada em 0,5m de fibra. O que se observa é que a anomalia é decomposta em quatro partes do pulso lançado, sendo então interpretada pelo sistema como uma variação de  $\frac{1}{4}$  da temperatura aplicada. Portanto, pulsos de luz analisados em intervalos de tempo menores apresentarão melhores resoluções.

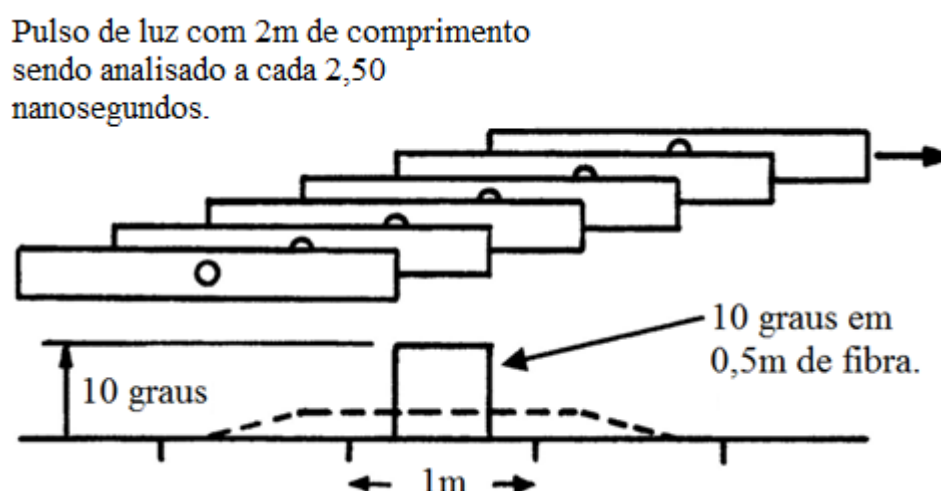


Figura 2.27. Luz sendo retro espelhada para o equipamento de projeção (Adaptado de Smolen e Spek, 2003).

### 2.3.2. Método do Gradiente

Em estruturas hidráulicas, especialmente em barragens de terra e diques, a temperatura interna é função do fluxo existente, definido pelas condições de contorno (AUFLEGER, 2005). Variações externas de temperatura (na água ou no ar) propagam para o interior do corpo da barragem por processos de condução e convecção, influenciando e definindo a distribuição da temperatura interna. Anomalias no fluxo como, por exemplo, induzidas por infiltrações geradas por anomalias de temperatura podem ser detectadas por meios diretos de medidas de temperatura distribuída.

O método do gradiente usa a temperatura como um indicador. Temperaturas são medidas em um ou mais pontos de um barragem ou dique para mostrar se a distribuição da temperatura presente identifica qualquer anomalia. Se este for o caso, podem-se contrastar as temperaturas anormais com a temperatura da água externa, e então verificar a presença de infiltrações.

O método do gradiente requer a presença de diferença de temperatura entre o meio externo (especialmente a temperatura da água do reservatório) e o entorno do cabo. Se esta condição não existir o método do Aquecimento deve ser utilizado.

O método do gradiente é uma ferramenta valiosa em situações onde o cabo ótico pode ser adequadamente instalado e haja suficiente diferença de temperatura entre o meio que envolve o cabo de fibra ótica e o que interage com ele. Normalmente aplicado em canais abertos ou barragens onde a camada de vedação deve ser monitorada, tão como em diques e em outras estruturas longitudinais a qual sua estabilidade depende da adequação do controle da linha de infiltração (AUFLEGER, 2005).

### 2.3.3. Método do Aquecimento

Originalmente, o método do Aquecimento foi desenvolvido para aplicações onde o método do Gradiente não pudesse ser aplicado. Sempre quando não existir um gradiente de temperatura suficiente entre o meio que envolve o cabo de fibra ótica e o que interage com ele. Este gradiente pode ser observado quando, por exemplo, a água do reservatório de uma barragem possuir temperatura diferente do núcleo da barragem onde um cabo foi distribuído. Caso ocorra uma infiltração, esta água entra em contato com o cabo e conseqüentemente a região afetada apresentará temperatura diferenciada do comprimento restante, possibilitando assim a identificação da infiltração (Schafer ET al, citado por PERZLMAIER et al, 2006). A Figura 2.28 ilustra as diferenças entre os métodos.

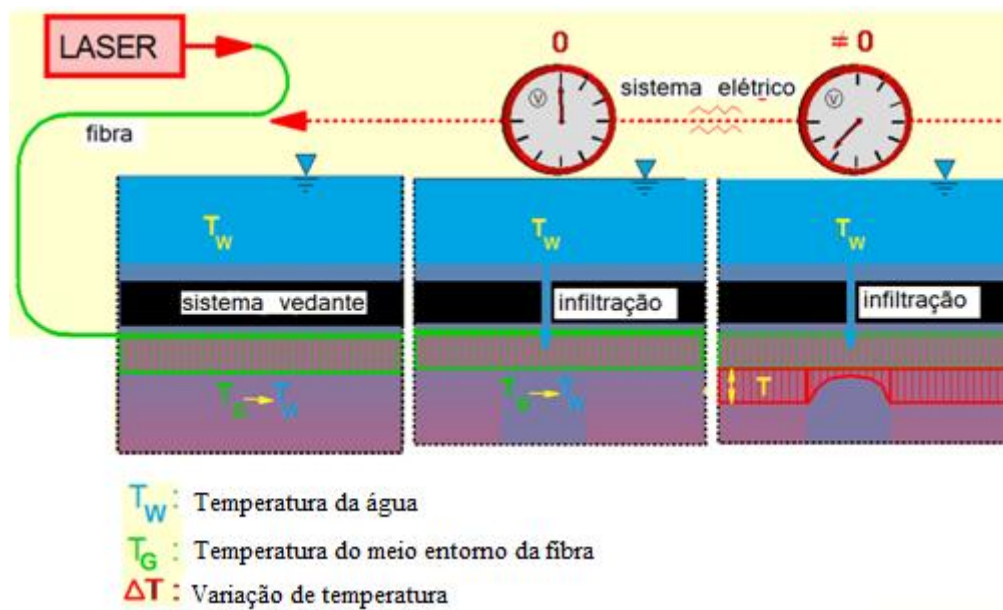


Figura 2.28. Diferenciação entre o método do gradiente e o método do aquecimento (adaptado de Aufleger e Goltz, 2009).

No método do aquecimento é necessária a utilização de cabos especiais compostos por fios de cobre distribuídos no entorno de um tubo perdido, o qual é preenchido com gel e onde estão presentes as fibras óticas. Externamente o conjunto é revestido com uma proteção de PEAD (PERZLMAIER et al, 2004) (Figura 2.29).

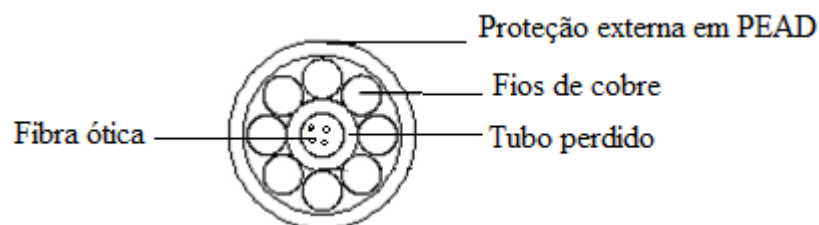


Figura 2.29. Seção transversal típica de um cabo de fibra óptica utilizada no método do aquecimento.

O método requer uma adequada distribuição de entrada de calor no cabo, possível de ser obtida através de fontes de aquecimento AC ou DC que produzem uma potência térmica linear se aplicada sobre fios de cobre integrados ao cabo de aquecimento (resistência ôhmica linear). (PERZLMAIER et al, 2006).

Para cabos com vários quilômetros de comprimento, é necessária a aplicação de tensão suficiente (transformador) ou utilização de uma grande seção transversal de cobre, que é limitada pelo diâmetro do cabo. (PERZLMAIER et al, 2006).

Através do método do aquecimento avaliam-se exclusivamente as diferenças de temperaturas ( $\Delta T$ ) obtidas durante a seção de referência (A) e durante a seção de aquecimento (B), presentes nas múltiplas curvas de aquecimento geradas (Figura 2.30).

A seção de referência corresponde ao tempo entre o início do ensaio ( $t_0$ ) e o início do aquecimento ( $t_0 \text{ hot}$ ), já a seção de aquecimento, se refere ao tempo entre  $t_0 \text{ hot}$  e o final do aquecimento ( $t_f \text{ hot}$ ), a partir deste ponto é dado o início à seção de resfriamento (C). O número de curvas geradas é dependente da resolução do equipamento e do comprimento de cabo monitorado.

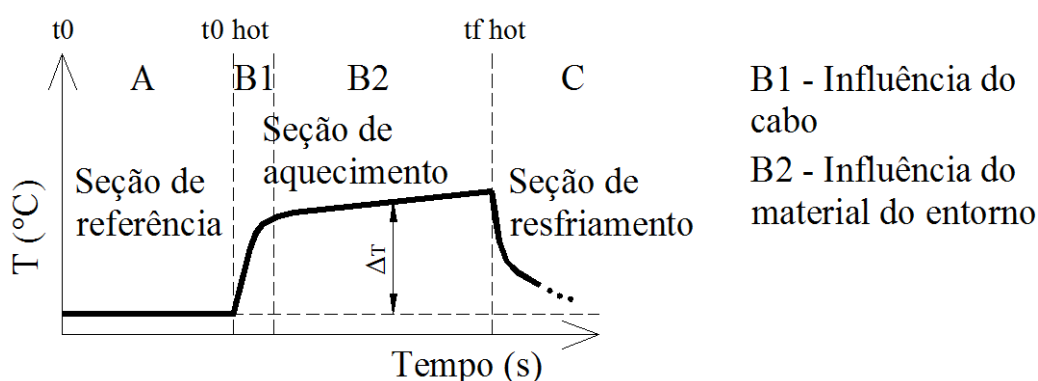


Figura 2.30. Desenvolvimento da temperatura no interior do cabo e as diferenças de temperatura calculadas (adaptado de PERZLMAIER et al, 2004).

O aumento da temperatura depende da capacidade e condutividade térmica do material no entorno do cabo (PERZLMAIER et al, 2004), as quais são influenciadas pela densidade, composição mineralógica e temperatura do solo (BECKER e FRICKE, 1997), porém o grau de saturação possui maior influência, pois a água ao entrar em contato com o solo se adere à superfície externa dos grãos formando pontes que os intercomunicam (Figura 2.31). Essa intercomunicação aumenta o fluxo de calor resultando em uma maior condutividade térmica. A Figura 2.32 ilustra a influência da densidade e do grau de saturação na condutividade térmica do solo.

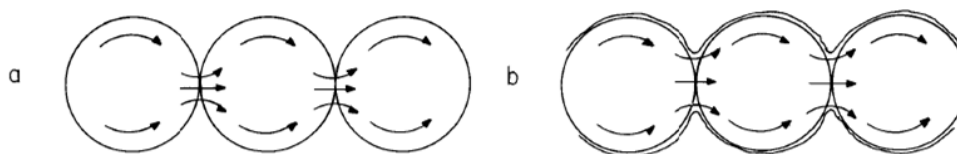


Figura 2.31. Propagação de calor por condução em um meio poroso seco (a) e úmido (b) (PREVEDELLO, 1996).



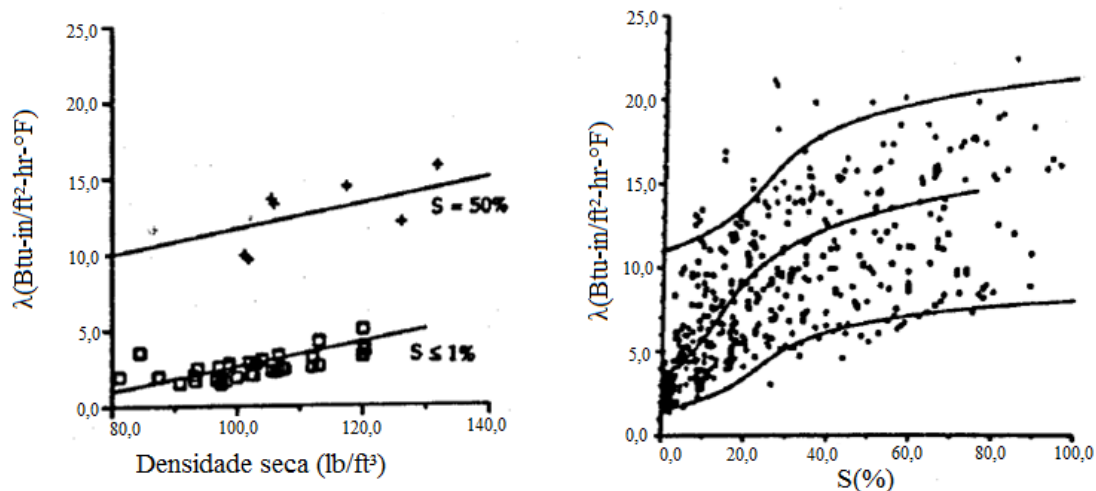


Figura 2.32. Influência da densidade e grau de saturação na condutividade térmica do solo (BECKER e FRICKE, 1997).

A resposta térmica do cabo  $\Delta T$  vista na Figura 2.30, depende da seção transversal do cabo (diâmetro, material constituinte) e do transporte de aquecimento da parede do cabo, sendo dominado por condução em solos parcialmente a totalmente saturados (Figura 2.33, direita) ou por convecção na presença de fluxo com velocidades maiores do que  $10^{-5}$  m/s (Figura 2.33, esquerda). (PERZLMAIER et al, 2006).

Portanto, a diferença de temperatura entre a seção de referência e a seção de aquecimento (resposta térmica  $\Delta T$ ) é composta pela diferença entre o núcleo do cabo e a parede ( $\Delta T_c$ ) mais a diferença entre a parede do cabo e o infinito ( $\Delta T_s$ ) (PERZLMAIER et al, 2006).

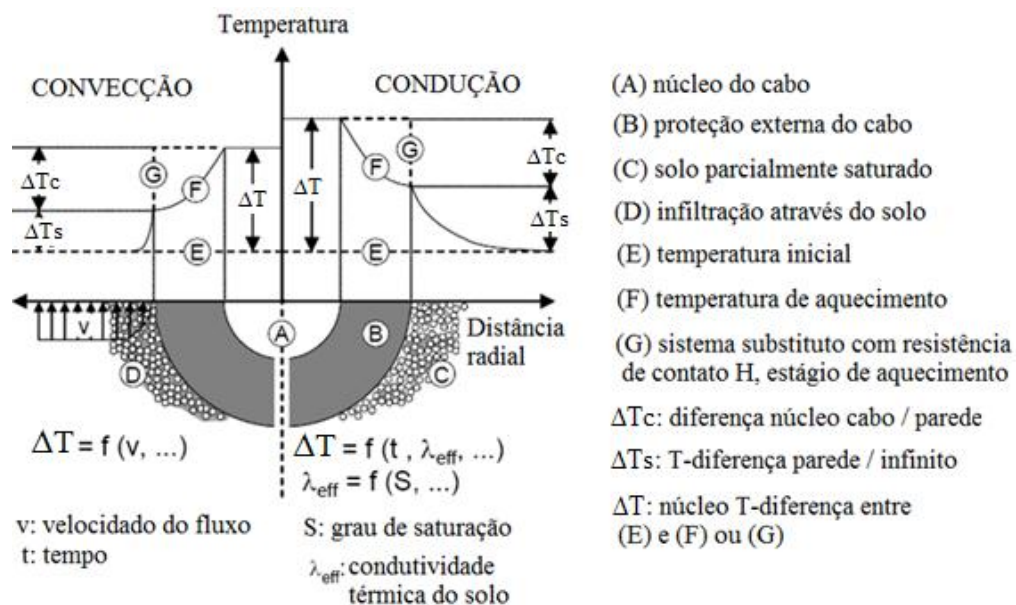


Figura 2.33. Distribuição de temperatura sobre a seção transversal de um cabo esquemático devido à convecção (esquerda) e a condução (direita), (adaptado de PERZLMAIER et al, 2006).

Conforme já observado, quando ocorre infiltração no entorno do cabo, o transporte de calor condutivo (Figura 2.34, direita) é superado pelo transporte de calor convectivo (Figura 2.34, esquerda). Devido a este fenômeno o calor do cabo é transportado para fora mais rapidamente e um estado de equilíbrio de temperatura é alcançado. Conseqüentemente, as seções do cabo em contato com fluxo de água mostram um aumento de temperatura muito menor do que aqueles sem. Este é o principal efeito utilizado para localizar infiltrações no meio utilizando o método do Aquecimento (GOLTZ e AUFLEGER, 2009).

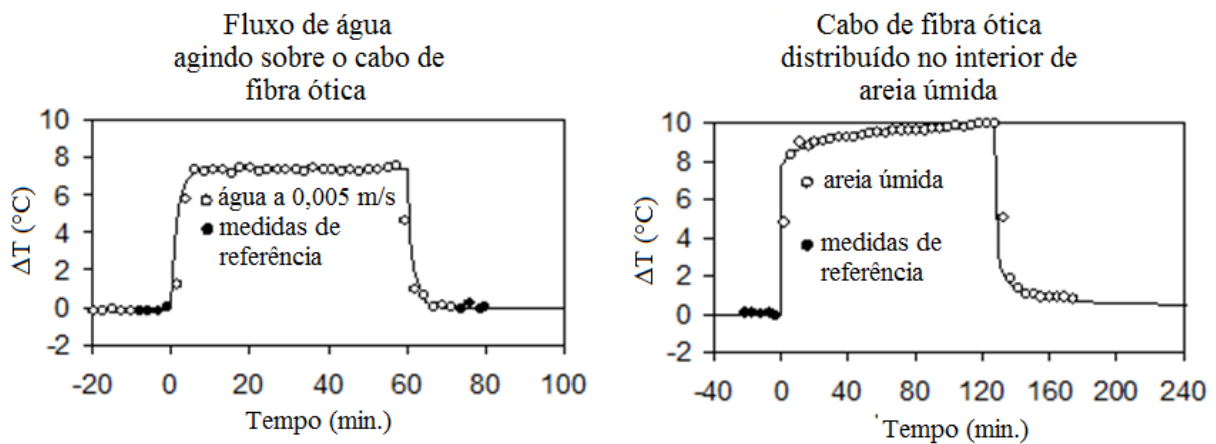


Figura 2.34. Medidas de temperatura durante um ciclo de aquecimento (adaptado de GOLTZ e AUFLEGER, 2009).

A partir do método do aquecimento é possível determinar a condutividade térmica do solo baseando-se no método do fio aquecido, onde seu valor é determinado através do monitoramento da dissipação do calor de uma fonte linear de aquecimento sob uma determinada voltagem (GOLTZ e AUFLEGER, 2009).

Segundo Kristiansen (1982) citado por Goltz e Aufleger (2009), para períodos longos de aquecimento o aumento da temperatura na fonte de calor (cabo de fibra ótica), pode ser calculado utilizando a Equação 2.18, que é uma solução aproximada para a transferência de calor a partir de uma fonte de calor cilíndrica em meios porosos infinitos. Ela negligencia todos os termos que resultam da transformação de Laplace da ordem de  $1/t^2$  e superiores.

$$T_1(t) \cong c_1 \cdot \ln(t) + c_2 + \frac{1}{t} (c_3 \cdot \ln(t) + c_4) \quad (\text{Eq. - 2.18})$$

Sendo:

$$c_1 = \frac{q_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \quad (\text{Eq. - 2.18.1})$$

$$c_2 = c_1 \left[ \ln \left( \frac{4}{r_{ext}^2} \right) - \gamma + \frac{2\lambda}{r_{ext} \cdot H} \right] \quad (\text{Eq. - 2.18.2})$$

$$c_3 = c_1 \frac{r_{ext}^2}{2\kappa} \left( 1 - \frac{\alpha\kappa}{r_{ext}\lambda} \right) \quad (\text{Eq. - 2.18.3})$$

$$c_4 = c_1 \cdot \frac{r_{ext}^2}{2\kappa} \left\{ \left( 1 - \frac{\alpha\kappa}{r_{ext}\lambda} \right) \left[ \ln \left( \frac{4\kappa}{r_{ext}^2} \right) - \gamma \right] + 1 - \frac{2\alpha\kappa}{r_{ext}^2 \cdot H} \right\} \quad (\text{Eq. - 2.18.4})$$

Onde:

$\lambda$  = condutividade térmica;

$\kappa$  = difusividade térmica do material do entorno, e

$\gamma$  = constante de Euler Mascheroni igual a 0,5772156.

A difusividade térmica ( $\kappa$ ) é a relação entre a condutividade térmica ( $\lambda$ ) e o calor específico volumétrico  $\mu$ , calculada pela Equação 2.19.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\mu} \quad (\text{Eq. - 2.19})$$

A condutância da superfície ( $H$ ) pode ser aproximadamente determinada pela Equação 2.20:

$$H = \frac{\lambda k}{dk} \quad (\text{Eq. - 2.20})$$

Onde: ( $dk$ ) é a espessura e ( $\lambda k$ ) é a condutividade térmica da camada de contato.

Se os termos da ordem  $1/t$  também forem negligenciados, a solução aproximada se torna mais simples e válida para períodos mais longos de aquecimento.

Esta forma de solução aproximada é também utilizada para a avaliação do teste de resposta térmica. A condutividade térmica pode ser obtida a partir da inclinação da curva de aquecimento em uma escala logarítmica de tempo, a partir da Equação 2.21.

$$\lambda_{ext} = \frac{q_l}{4\pi} \cdot \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{T_1(t_2) - T_1(t_1)} \quad (\text{Eq. - 2.21})$$

Para  $t \rightarrow \infty$  a condutividade térmica calculada após a (Eq. – 2.21) representará a condutividade térmica real. De acordo com Abu-Hamdeh et al (2001) citado por Goltz e Aufleger (2009), a condutividade térmica também pode ser calculada a partir da curva de resfriamento usando-se a Equação 2.22.

$$\lambda_{ext} = \frac{q_l}{4\pi} \frac{\ln\left(\frac{(t_2/t_1) \cdot (t_1 - t_h)}{(t_2 - t_h)}\right)}{T_1(t_1) - T_1(t_2)} \quad (\text{Eq. - 2.22})$$

Onde:  $th$  é o período de aquecimento.

Farouki (1986) citado por Becker e Fricke (1997), analisou diferentes métodos de previsão de condutividade térmica objetivando determinar suas limitações de aplicabilidade (Tabela 2.4).

Tabela 2.4. Aplicação dos diferentes métodos de previsão (Farouki (1986) citado por Becker & Fricke, 1997).

Estado	Textura	Saturação	Método
Descongelado	Granulometria grossa	0,015 - 0,100	Van Rooyen and Winterkorn (exceto para areia com baixo teor de quartzo)
		0,100 - 0,200	De Vries
		0,200 - 1,000	Johansen
		0,000 - 1,000	Gemant (areia silte-argilosa)
		Saturado	Johansen, De Vries, Gemant
	Granulometria fina	0,000 - 0,100	Johansen (valores subestimados em 15%)
		0,100 - 0,200	Johansen (valores subestimados em 5%)
		0,200 - 1,000	Johansen
		Saturado	Johansen, De Vries, Gemant
Congelado	Granulometria grossa	0,100 - 1,000	Johansen
		Saturado	Johansen, De Vries
	Granulometria fina	0,000 - 0,900	Kersten
		0,100 - 1,000	Johansen
		Saturado	Johansen, De Vries

Conforme pode ser observado na Tabela 2.4, o método desenvolvido por Johansen em 1975 possui maior campo de aplicabilidade nas diferentes condições de estado e textura do solo.

Este método pode ser visto em Tang et al (2000), o qual utiliza a Equação 2.23.

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry})\lambda_e + \lambda_{dry} \quad (\text{Eq. - 2.23})$$

Onde:  $\lambda_{sat}$  e  $\lambda_{dry}$  são respectivamente a condutividade térmica no estado saturado e seco para a mesma densidade seca (Equações 2.23.1 e 2.23.2), e  $\lambda_e$  é uma função que representa a influência do grau de saturação  $S$  na condutividade  $\lambda$  (Equação 2.23.3), calculados pelas equações abaixo:

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{(1-n)} \lambda_w^n \quad (\text{Eq. - 2.23.1})$$

Onde:

$n$  = porosidade;

$\lambda_w$  = condutividade térmica da água (0,57W/mK),

$\lambda_s$  = condutividade térmica dos sólidos obtida pela Equação 2.19.1.1:

$$\lambda_s = \lambda_q^q \lambda_0^{1-q}, \quad (\text{Eq. - 2.23.1.1})$$

Onde:

$\lambda_q$  = condutividade térmica do quartzo (7,7W/mK);

$\lambda_0$  = condutividade térmica dos outros minerais, e

$q$  = fração volumétrica do quartzo.

$$\lambda_{dry} = \frac{0,135\rho_d + 64,7}{\rho_s - 0,947\rho_d} \quad (\text{Eq. - 2.23.2})$$

Onde: o peso unitário seco ( $\rho_d$ ) e o peso unitário dos sólidos ( $\rho_s$ ) são expressos em kg/m³.

$$\lambda_e = 1,0 + \log_{10} S \quad (\text{Eq. - 2.23.3})$$

### 3. METODOLOGIA DA PESQUISA

#### 3.1. Definição

A definição da metodologia empregada foi determinada após o intercâmbio realizado no departamento de Hidráulica – IWI, da Universidade Leopold Franzens, locada na cidade de Innsbruck, capital de Tirol, Áustria.

Durante os meses de abril a setembro de 2010, foram realizadas atividades em projetos desenvolvidos tanto em laboratório quanto em campo, pertencentes aos doutorandos Matthias Goltz e Gerhard Kapeller, e denominados “*Distributed Fiber Optic Measurements for Dam Monitoring*” e “*Distributed Saturation and Flow Velocity Measurement in Alpine Hillslopes*” respectivamente, os quais são orientados pelo professor doutor Markus Aufleger. Ambos os projetos utilizam o método do aquecimento, porém com objetivos diferentes.

As atividades desenvolvidas em laboratório simulavam a infiltração de água com diferentes velocidades, agindo sobre diferentes cabos de fibra ótica dispostos linearmente no interior de uma caixa metálica de 7,8m<sup>3</sup> preenchida com areia que serviu como um modelo em escala real (Figura 3.1). O objetivo deste trabalho era de calibrar diferentes cabos de fibra ótica para uso no monitoramento de infiltração de água em barragens.

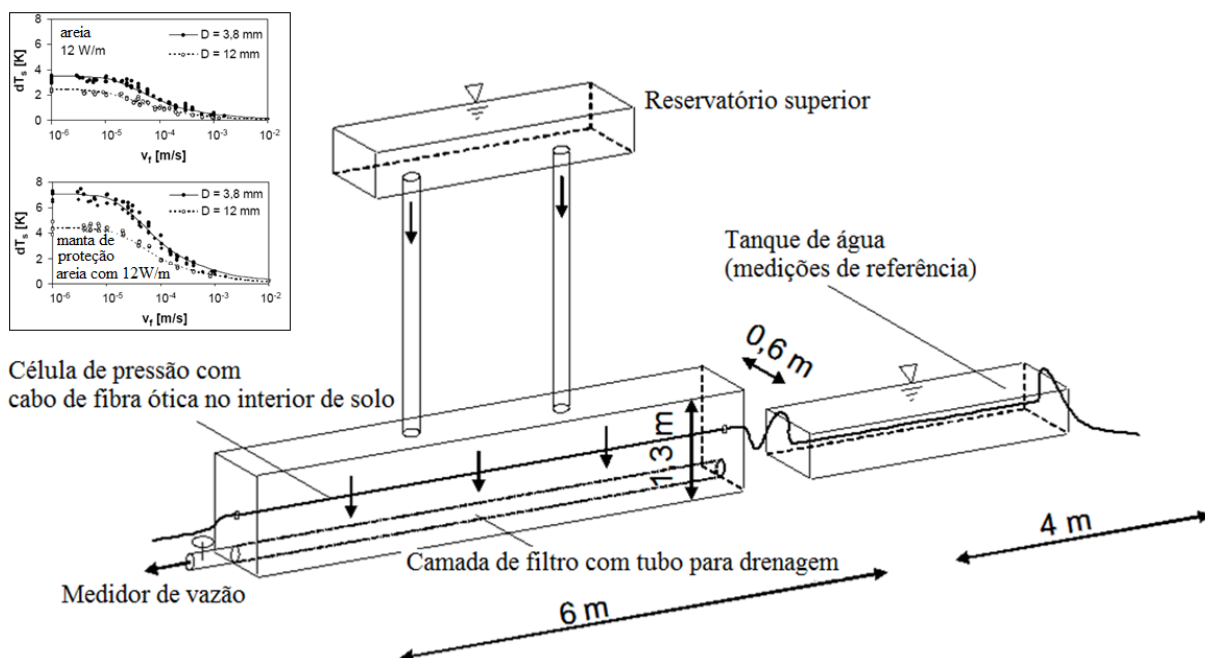


Figura 3.1. Layout do modelo utilizado para calibração dos diferentes cabos de fibra ótica (adaptado de GOLTZ e AUFLEGER, 2009).

Os trabalhos em campo visavam medir a saturação e o fluxo de água agindo em uma encosta natural após a ocorrência de eventos naturais e artificiais de chuva. A precipitação da água gerada pelo sistema artificial se fez após a implantação de um sistema de irrigação sobre a área em estudo, a qual foi abastecida sob pressão com água bombeada de um recurso hídrico natural (Figura 3.2). Os cabos de fibra ótica foram previamente introduzidos em duas camadas próximas a superfície do solo e, através da aplicação do método do aquecimento, estima-se alcançar os objetivos supracitados.



Figura 3.2. Teste de campo realizado pela universidade de Innsbruck na bacia hidrográfica de Loehnersbach, em Salzburg, Áustria (do autor).

Os trabalhos não se limitaram apenas ao entendimento da aplicação do método do aquecimento no monitoramento de obras geotécnicas, mas também contribuiu em aprendizados diversos, tais como: manusear diferentes tipos de fibras e cabos óticos, operar equipamentos como o Sensor Distribuído de Temperatura – *DTS* e o Sensor Distribuído de Temperatura e Deformação – *DTSS*, configurar sistemas eficientes de monitoramento e também especificar diferentes tipos de fibras ou cabos para os diferentes tipos de aplicação.

De forma diferenciada e inovadora, os sistemas implantados nesta dissertação contaram com a distribuição helicoidal da fibra ao longo de uma estrutura, seja ela metálica ou plástica, diferenciando do método convencional onde sua distribuição se faz de forma linear. Isto acarretou no aumento da resolução espacial tendo em vista a limitação do equipamento.

Os itens a seguir descrevem a metodologia empregada para cumprir com o objetivo principal desta dissertação.

### 3.2. Monitoramento da Frente de Umedecimento

#### 3.2.1. Desenvolvimento do Sistema Helicoidal de Fibra Ótica - SHFO

A idéia de monitorar frente de umedecimento, utilizando a técnica distribuída de medição de temperatura DTS, surgiu da necessidade de aumentar o número de parâmetros que auxiliassem no monitoramento de deslizamentos de terra.

A questão a ser solucionada a partir de então foi: como inserir esta instrumentação no maciço para cumprir com esta finalidade?

Inicialmente, a intenção foi distribuir linearmente a fibra em camadas de solo com diferentes profundidades (Figura 3.3), para tentar determinar através da observação das variações de temperatura, possivelmente provocadas pela presença da água, o posicionamento da frente de umedecimento. Esta prática foi descartada, pois a instalação do cabo em camadas com profundidades superiores a poucos centímetros seria praticamente inviável.

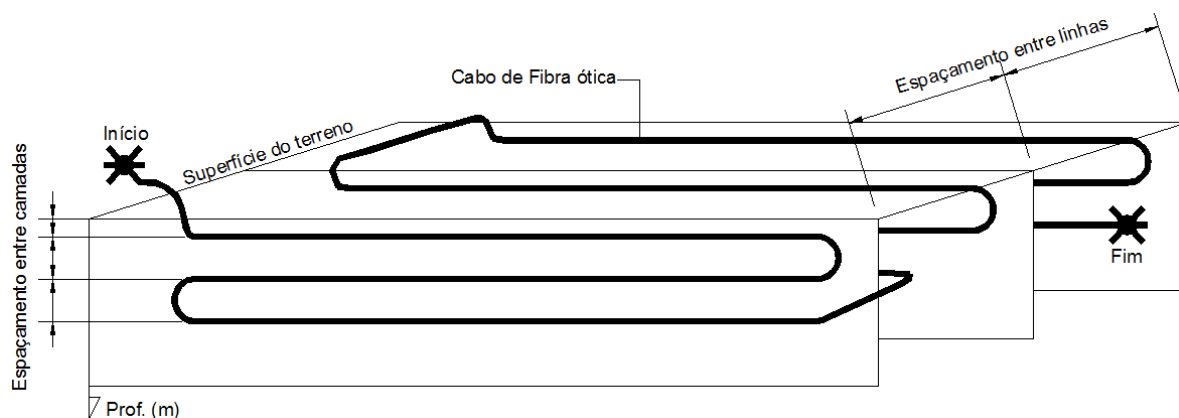


Figura 3.3. Distribuição linear da fibra em diferentes camadas do solo (do autor).

A idéia seguinte foi introduzir a fibra verticalmente no solo (Figura 3.4, Disposição 1), pois assim o alcance de camadas presentes em grandes profundidades seria facilitado, tendo em vista que um simples furo de sondagem atenderia esta necessidade. Porém, devido à resolução do sistema DTS, o qual fornece a média de temperatura a cada 1,02m do cabo, o número de pontos utilizados para detectar o avanço da frente de umedecimento se limitaria a esta característica do sistema, conseqüentemente a precisão do monitoramento seria baixa. Sendo assim, surgiu a idéia de distribuir de forma helicoidal o cabo de fibra ótica em torno de uma estrutura (Figura 3.4, Disposição 2), o que resultaria no aumento da resolução, ou seja, o



comprimento da estrutura seria inferior ao comprimento de cabo disposto sobre ela, conseqüentemente aumentando o número de pontos coletados em cada metro do furo. Essa união foi nomeada de Sistema Helicoidal de Fibra Ótica (SHFO).

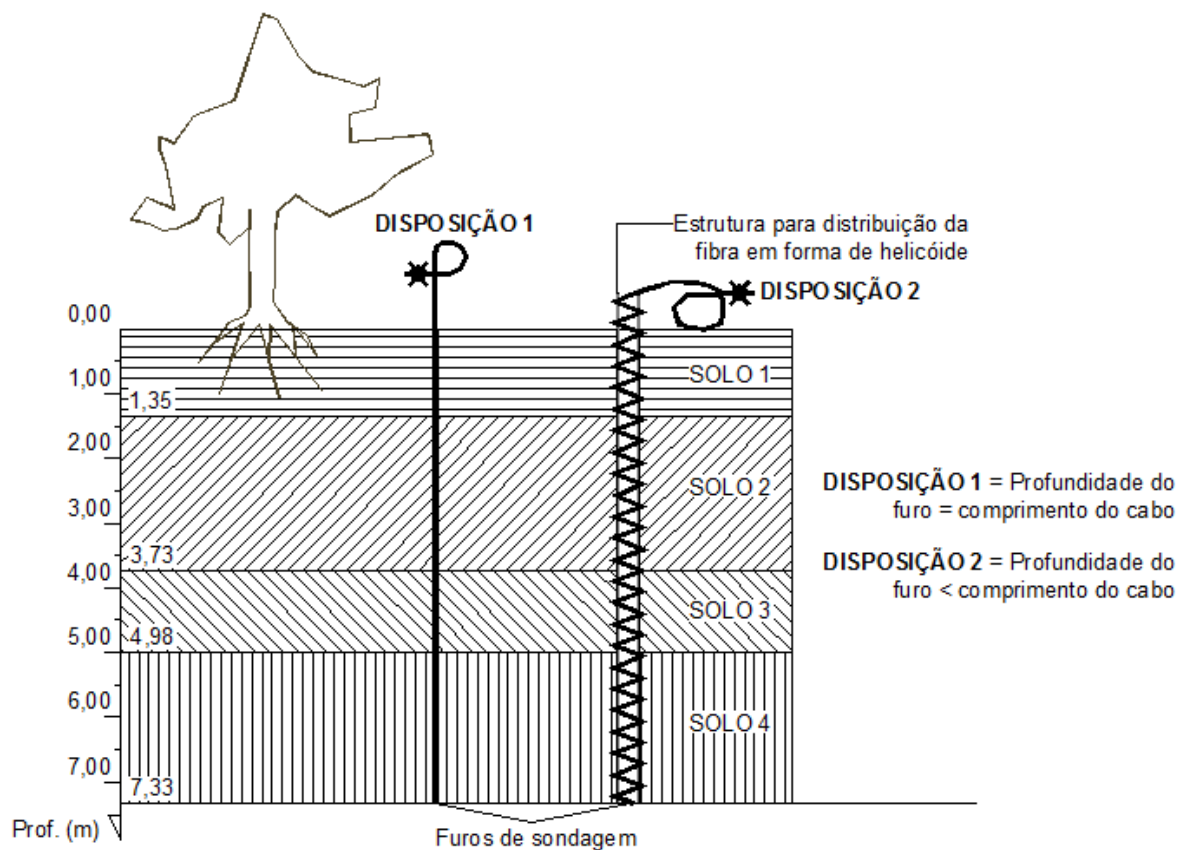


Figura 3.4. Vantagem do SHFO. (do autor).

O cabo utilizado no SHFO possui diâmetro externo de 5,6mm, é constituído de um tubo perdido no centro com 4 fibras em seu interior, todas elas são multimodo, com núcleo de 50 $\mu$ m de diâmetro cada e com revestimento primário e proteção externa de 125 $\mu$ m e 250 $\mu$ m de diâmetro, respectivamente. Ao redor do tubo perdido são disposto fios de cobre com uma seção transversal total de 4mm<sup>2</sup>, tudo envolvido por um revestimento plástico de PEAD. A Tabela 3.1 resume as características do cabo.

Tabela 3.1. Características do Cabo de fibra ótica

Marca	Geometria	Características elétricas			Características óticas	
Leoni	Dc (mm)	Quantidade (-)	Área (mm <sup>2</sup> )	Material (Cu/St)	Tubo Perdido (-)	Fibras (-)
	5,6	1	4	Cu	1	4

A estrutura utilizada no SHFO é composta por quatro barras de aço com 6,3 mm de diâmetro, unidas por estribos espaçados a cada cinquenta centímetros, formando uma seção quadrada com aresta de 10cm. A resolução final, após a distribuição do cabo de fibra ótica em torno da estrutura proposta foi aumentada para 6m de fibra para cada metro da estrutura, o equivalente a 6 sensores a cada metro de profundidade. A fixação do cabo de fibra ótica à estrutura se fez através de braçadeiras plásticas colocadas a cada volta.

A Figura 3.5 detalha as dimensões do SHFO.

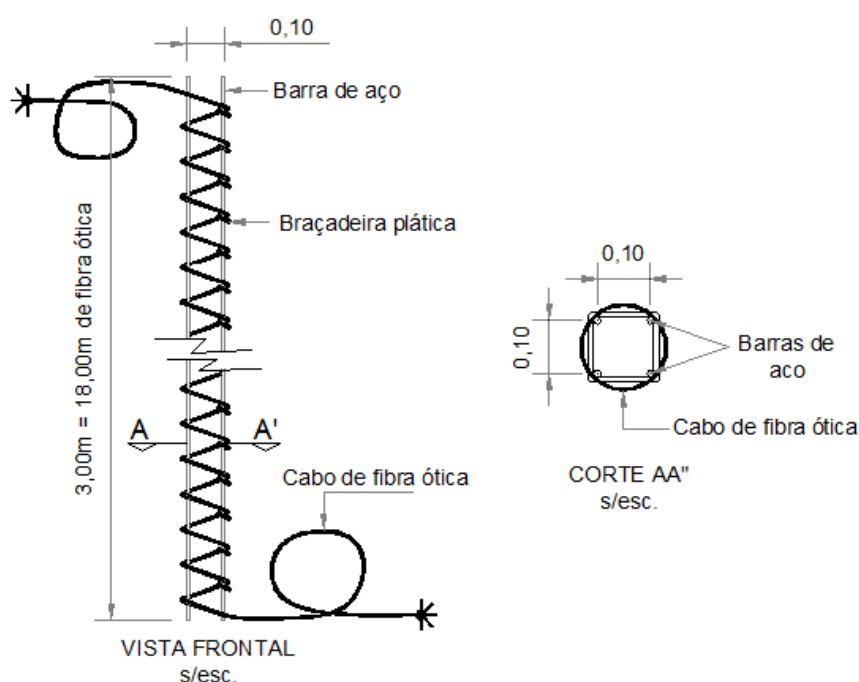


Figura 3.5. Esquema típico do SHFO empregado no ensaio. (do autor).

### 3.2.2. Desenvolvimento do modelo para simulação da frente de umedecimento

Outro problema a ser solucionado seria como detectar a presença da frente de umedecimento através de um sensor de temperatura. Isso só seria possível caso existisse um gradiente de temperatura entre o meio que envolve o cabo (solo) e o que por ventura interaja com ele (água). Naturalmente esse fenômeno acontece, porém havia dúvida se a variação natural da temperatura seria suficiente para o sistema DTS detectá-la, além do mais, até que profundidade este fenômeno estaria presente. Diante dessas incertezas, excluiu-se a possibilidade da utilização do método do gradiente, dando preferência ao emprego do método do aquecimento, pois desta forma a temperatura do cabo pode ser artificialmente alterada, distinguindo-se da temperatura da frente de umedecimento.

Definida a forma com que a fibra seria introduzida no solo e o método a ser utilizado, o próximo passo foi determinar um modelo para simular em laboratório um evento natural de chuva seguido de infiltração de água em um perfil natural de solo.

Para tanto decidiu-se utilizar um tubo de PVC com 3,00m de comprimento e 20cm de diâmetro (Figura 3.6), adaptado com 8 furos na posição direita para colocação de sensores de umidade (*Frequency Domain Reflectometer* – FDR), e 3 furos no lado oposto para fixação de sensores de temperatura (termômetros resistivos – TR). Todos os furos estavam alinhados e espaçados entre si a cada 28cm e 84cm, respectivamente.

Para possibilitar a observação visual do avanço da frente de umedecimento, foram projetadas janelas de observação com dimensões de 2cm de largura por 15cm de comprimento, todas dispostas no alinhamento frontal do tubo. As janelas de observação serviram também para identificar o tempo de chegada da frente de umedecimento aos sensores através de cronômetros, pois visualmente era nítida a sua movimentação.

A vedação das janelas foi realizada utilizando fita adesiva transparente, colando-a no sentido longitudinal e transversal do comprimento do tubo, em uma sobreposição de três camadas. O suficiente para suportar a pressão hidrostática da água.

A extremidade inferior do tubo foi vedada com um CAP de PVC enquanto a extremidade superior permaneceu aberta, permitindo assim a introdução do SHFO, solo e água.

Com o intuito de simular um lençol freático, foi instalada na extremidade inferior do tubo uma válvula capaz de controlar a saída de água. A esta válvula foi adaptada uma mangueira na posição vertical e paralela ao tubo com comprimento de 2,5m, o que possibilitou a variação do nível do lençol freático até a superfície do solo. Este modelo é chamado de Tubo de Frente de Umedecimento (TFU)

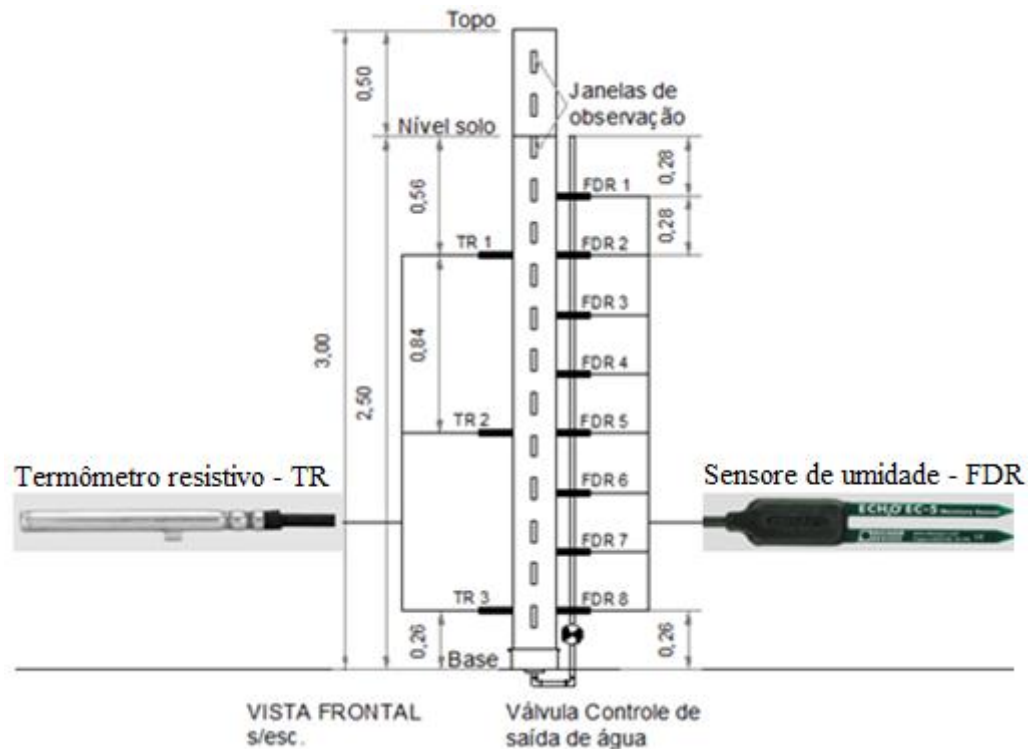


Figura 3.6. Modelo utilizado para simular a frente de umedecimento (TFU) (do autor).

Nesse momento, necessitava-se apenas adquirir o solo a ser utilizado no ensaio. Para tanto, decidiu-se utilizar um material arenoso e com alta permeabilidade para facilitar o avanço da frente de umedecimento. O material adquirido foi fornecido por uma empresa de extração de areia local, não havendo um critério específico para sua escolha. Com o material em mãos iniciou-se sua caracterização, a qual é apresentada a seguir.

De acordo com as normas brasileiras referentes a cada tipo de ensaio, o solo foi caracterizado e obtiveram-se os seguintes resultados: trata-se de uma areia siltosa, com massa específica real dos grãos ( $\gamma_s$ ) de 2,641 g/cm<sup>3</sup>, índice de vazios ( $e$ ) mínimo ( $e_{min.}$ ) e máximo ( $e_{max.}$ ) de 0,53 e 0,8, respectivamente, coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) de  $6,7 \cdot 10^{-4}$  cm/s para um índice de vazios de 0,6, e cuja curva granulométrica é apresentada na Figura 3.7.

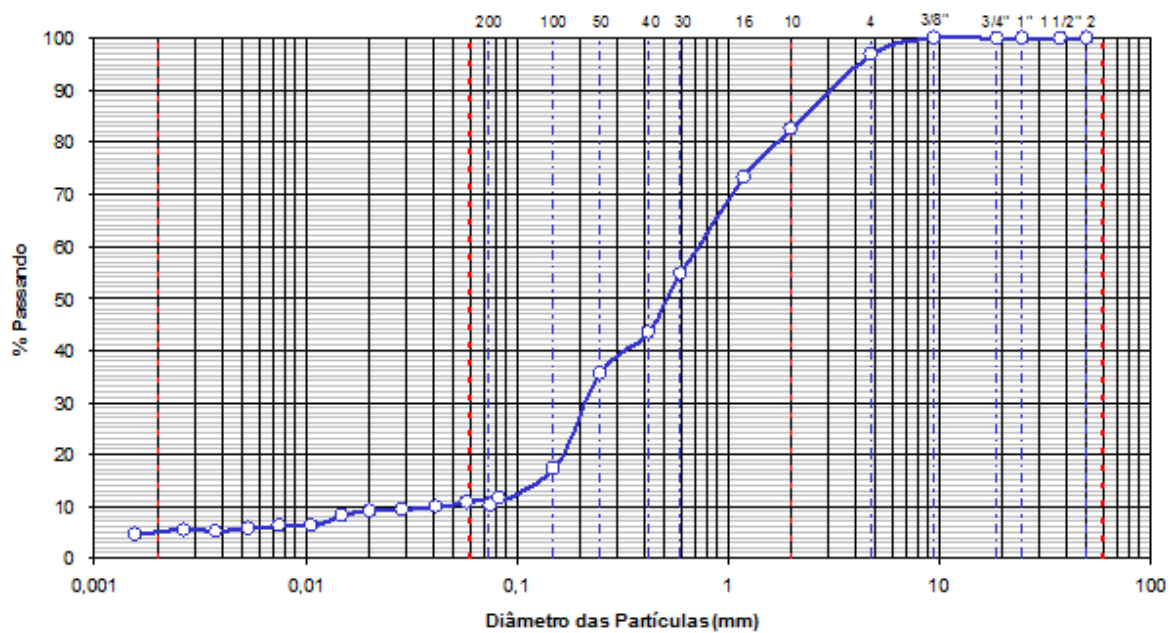


Figura 3.7. Curva granulométrica do solo utilizado

A curva característica do solo foi determinada através da técnica do papel filtro (Figura 3.8). Esta técnica é considerada de relativa facilidade de execução e se baseia no princípio que dois materiais porosos quando colocados em contato irão ceder ou absorver água até que o equilíbrio de pressão entre eles seja alcançado.

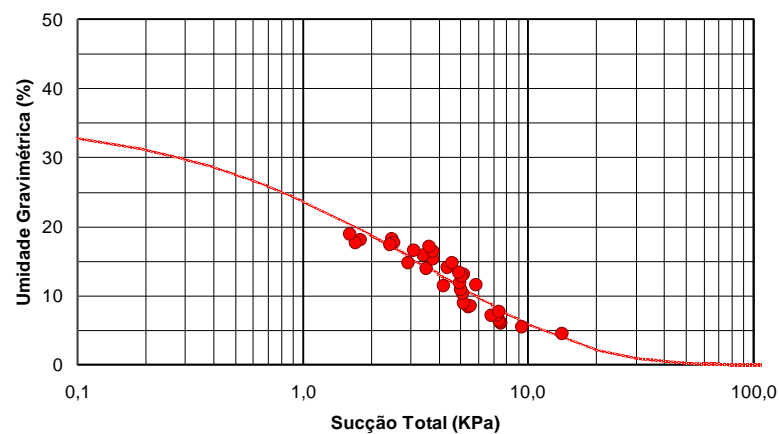


Figura 3.8. Curva característica do solo utilizado

Neste ensaio foi utilizado o papel filtro *Whatman* no. 42, onde segundo Chandler et. al. (1992) citado por Bowzowski (2008) a sucção é determinada através das equações 3.1.1 e 3.1.2.

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05 - 2,48 \log w)}$$

3.1.1

para umidade (w) do papel filtro superior a 47%;

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622 w)},$$

3.1.2

para umidade (w) do papel filtro igual ou superior a 47%.

O objetivo deste ensaio foi o de determinar a sucção total do solo. Para tanto, foram utilizados corpos de prova representados por anéis de PVC com 47mm de diâmetro e 20mm de altura, juntamente com uma placa circular totalmente furada com 2mm de espessura e diâmetro ligeiramente inferior ao anel de PVC, posicionada sobre a amostra, impedindo o contato direto do papel filtro com o solo.

O solo foi disposto no interior dos anéis de PVC, cada qual com diferentes teores de umidade gravimétrica.

No total, 50 amostras foram ensaiadas, todas seguindo o mesmo padrão de amostragem, onde o conjunto (solo, anel de PVC, placa circular e papel filtro) após moldado era envolto por camadas de filme plástico para não ocorrer a troca de umidade com o meio, e por papel alumínio para garantir o isolamento térmico. Finalmente, as amostras foram acondicionadas no interior de uma caixa de isopor por um período de 14 dias, necessários para a estabilização das pressões.

Após este período os papéis filtro foram cuidadosamente dispostos no interior de sacos plásticos para impedir a variação da umidade, e logo após pesados. Em seguida foram retirados do interior dos sacos e secos em estufa a 60° C. A umidade foi determinada colocando os papéis filtro secos novamente nos respectivos sacos plásticos e pesando-os.

A curva característica utilizada foi determinação pela Equação 3.2 proposta por Fredlung e Xing (1994). Os parâmetros de ajuste desta curva são descritos na Tabela 3.2.

$$\theta_w(w) = \theta_s \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{Cr}\right)} \right] * \left[ \frac{1}{\ln\left\{ \exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n \right\}^m} \right] \quad 3.2$$

Tabela 3.2. Parâmetros de ajuste da curva característica do solo.

<b><math>\theta_s</math></b>	37,24	<b>m</b>	394,00
<b>Cr</b>	19859,78	<b>a</b>	9999,64
<b>n</b>	0,63	<b>R<sup>2</sup></b>	0,88

Como o material entregue apresentava alta umidade, decidiu-se secá-lo, de forma a simular o primeiro avanço da frente de umedecimento em condições de areia seca ao ar.

Para tanto, distribuiu-se o solo sobre uma lona exposta ao sol (Figura 3.9, superior) e, em dias chuvosos, utilizou-se uma estufa (Figura 3.9, inferior).



Figura 3.9. Processo de secagem da areia ensaiada.

Devido à grande quantidade de material adquirido ( $12\text{m}^3$ ), precisou-se estocá-lo em ambiente onde se pudesse transportá-lo com facilidade e, ao mesmo tempo, não sofresse influência da umidade externa após secagem. Por esse motivo, utilizaram-se sacos sintéticos chamados de *Big Bag* altamente resistentes e que facilitaram o manuseio do solo, pois apresentavam alças na parte superior para fixação de um guincho (Figura 3.10, superior esquerda), e uma abertura na face inferior que facilitava a descarga (Figura 3.10, superior direita).





Figura 3.10. *Big Bag* utilizados para estocagem e transporte do solo.

### 3.2.3. Execução do ensaio

Nesse momento, possuíam-se todos os materiais e equipamentos necessários para a execução do ensaio. A partir de então, deu-se início a sua montagem do aparato, partindo pela fase mais trabalhosa: distribuir o cabo de fibra ótica entorno da estrutura. A configuração final do posicionamento do cabo e os comprimentos utilizados em cada trecho são apresentados na Figura 3.11.

Observam-se também dois trechos (B-C e F-G) que foram utilizados como referência.

Sua finalidade será descrita abaixo, durante a explicação da configuração da unidade leitora DTS.



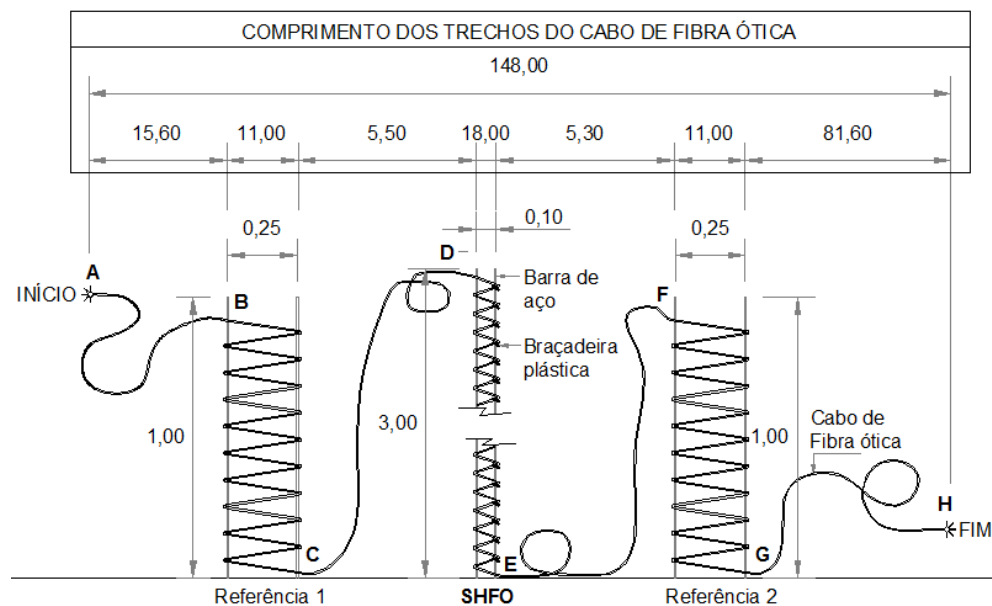


Figura 3.11. Distribuição do cabo de fibra ótica (do autor)

Em seguida, o SHFO foi introduzido no TFU que estava previamente fixado na posição vertical. Posteriormente, o TFU foi preenchido com o solo seco ao ar. A quantidade de solo foi dimensionada em peso, tendo como referência o volume de solo ( $V$ ), o peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ ) e o índice de vazios ( $e$ ) de 0,6 (Tabela 3.3).

Foram utilizados um funil e um soquete para auxiliar na distribuição e compactação do solo, porém não foi possível garantir que toda a coluna de solo apresentava-se com densidade constante, tendo-se em vista que o funil estava fixo no topo da tubulação, provocando assim a variação da altura de queda à medida que o tubo era preenchimento.

Tabela 3.3. Determinação do peso do solo seco.

Índice de vazios ( $e$ )		0,6	
Peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ )		2,641 ton/m <sup>3</sup>	
Porosidade (n)		0,375	
Volume	Tubo PVC ( $V_{tb}$ )		0,07854 m <sup>3</sup>
	Estrutura metálica ( $V_{est}$ )		0,00035 m <sup>3</sup>
	Fibra ótica ( $V_{fo}$ )		0,00041 m <sup>3</sup>
	Solo	Vazios ( $V_v$ )	0,02917 m <sup>3</sup>
		Sólidos ( $V_s$ )	0,04861 m <sup>3</sup>
Peso do solo seco ( $P_s$ )		128,38 kg	

Finalizado o preenchimento, o próximo passo foi fixar os sensores (FDR e TR), os quais serão utilizados para validar os resultados obtidos pelo sensor DTS. Os sensores foram introduzidos no TFU em suas respectivas posições, de forma lenta e cuidadosa para que todas as superfícies dos sensores ficassem em contato com o solo sem a presença de vazios. A

estanqueidade do sistema foi garantida utilizando silicone entre o sensor e a parede do furo. A configuração final do modelo pode ser observada na Figura 3.12.

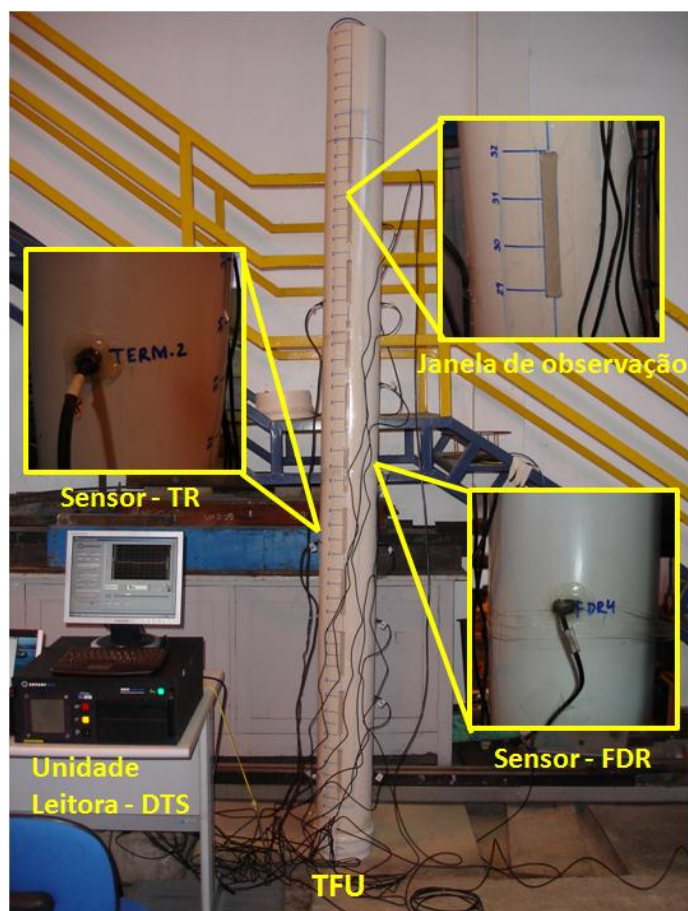


Figura 3.12. Configuração do modelo utilizado para simular a frente de umedecimento (do autor).

Para dar início ao ensaio, foi necessário fazer as conexões dos sensores às suas respectivas fontes de aquisição de dados (dataloggers) (Figura 3.13).

O sensor de temperatura DTS (cabo de fibra ótica) é diretamente conectado à unidade leitora (Sensornet DTS System Sentinel SR) através de um conector E2001 acoplado em uma das quatro fibras multimodo. Partes das extremidades do cabo foram abertas para que os fios de cobre pudessem ser conectados a fonte de aquecimento FCC 900-30i. Os dados obtidos tanto pelo sistema DTS quanto pela FCC 900 30i foram transferidos para o computador através de cabo serial.

Os sensores de temperatura TR foram conectados ao datalogger KYOWA que estava diretamente conectado ao computador.

Os sensores de umidade FDR estavam conectados a dois dataloggers, pois cada unidade possui apenas 4 entradas. A comunicação com o computador se fez através de cabo USB.

Na Figura 3.13 é possível observar também a presença de dois elementos com características idênticas chamados de Barril de referência (B01 e B02). Nesses compartimentos foram introduzidas as seções de referência acima mencionadas e posteriormente preenchidos com água.

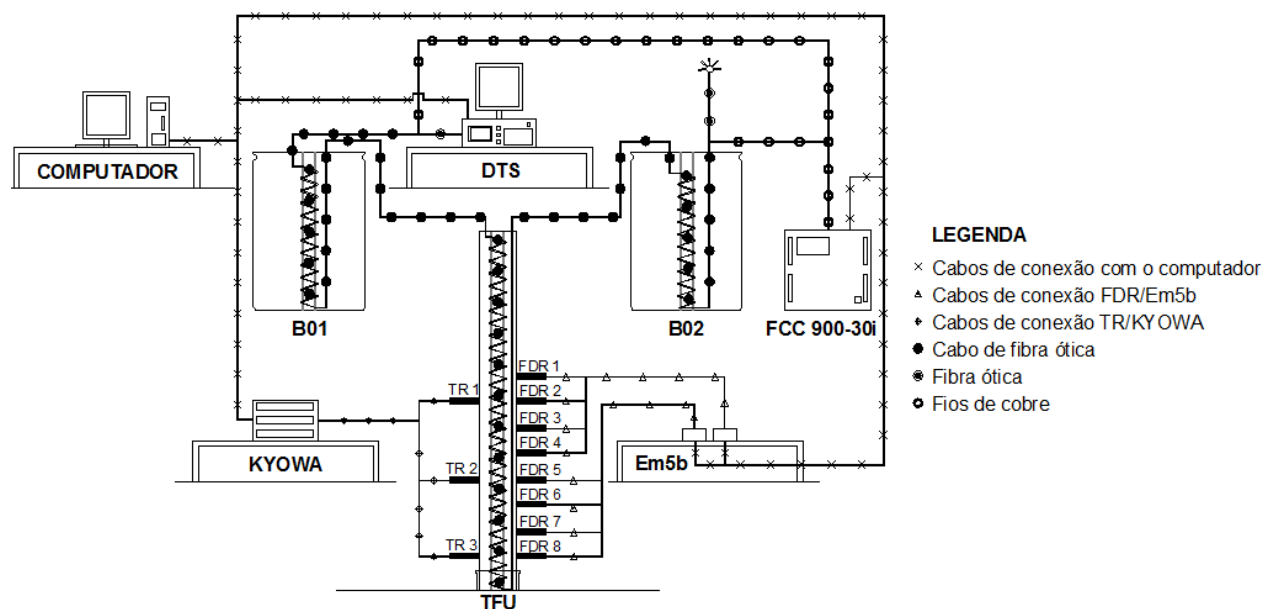


Figura 3.13. Configuração do sistema de aquisição de dados (do autor)

Depois de realizada a conexão dos equipamentos iniciou-se a configuração das unidades leitoras (DTS/FCC 900-30i/KYOWA/Em5b), que resumidamente consistiu em determinar o tempo de aquisição de dados, fixado em 2 minutos. Com exceção, as unidades DTS e FCC 900-30i precisaram de ajustes adicionais de acordo com o que seguem.

Para que as temperaturas absolutas lidas no sistema DTS fossem confiáveis, foi necessário expor trechos específicos do cabo chamados de referência 1 e 2, sob condições de temperatura conhecida, pois o perfil de temperatura inicialmente obtido pelo DTS (Figura 3.14) geralmente apresenta algumas incoerências com relação à temperatura real, chamadas de rampa – *slope*, inclinação da curva de temperatura, e degrau – *offset*, variação da temperatura absoluta de um determinado ponto. A correção deste perfil foi realizada na tela de configuração do DTS através da calibração dos respectivos coeficientes. Para tanto, foi necessário conhecer a temperatura do meio em que as referências estavam expostas (B01 e B02), facilmente identificadas através do uso de termômetro convencional.

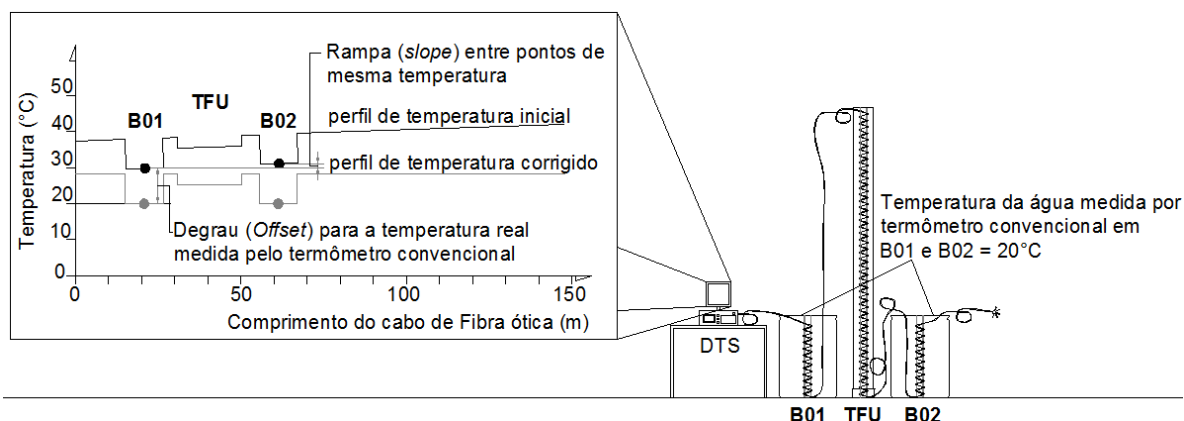


Figura 3.14. Calibração dos parâmetros *slope* e *offset* (do autor)

O sistema de aquecimento FCC 900-30i foi configurado para trabalhar com uma entrada de calor ( $q_l$ ) de 12W/m, tendo como base o comprimento de fios de cobre ( $L_{el}$ ) que é igual ao comprimento do cabo de fibra ótica, a área da seção transversal de cobre ( $A_{el}$ ) e a resistência específica do cobre ( $\rho_{el}$ ) (Tabela 3.4). Para tanto foram utilizadas as Equações 3.2 e 3.3 para determinar o valor da tensão e corrente, necessárias para cumprir com esta exigência.

Tabela 3.4. Dimensionamento do sistema de aquecimento.

Fluxo de Calor ( $q_l$ )	12	W/m
Comprimento do cabo de fibra ótica ( $L_{fo}$ )	148	m
Área da seção transversal dos fios de cobre ( $A_{el}$ )	4	mm <sup>2</sup>
Resistência específica do cobre ( $\rho_{el}$ )	0,0178	$\Omega$ mm <sup>2</sup> /m
Potência total ( $q$ )	1776	W
Comprimento de cobre ( $L_{el}$ )	148	m
Resistência do sistema	0,6586	$\Omega$
Corrente calculada	51,92907869	A
Tensão calculada	34,20049122	V

O passo seguinte foi executar o ensaio, o qual foi iniciado pelas leituras das primeiras informações de temperatura e umidade medidas pelos sensores DTS, TR e FDR, respectivamente. Durante os primeiros 60 minutos as condições naturais do meio não foram alteradas, desta forma os sensores gravaram apenas as variações climáticas do ambiente. Este período de tempo corresponde à seção de referência observada nos resultados obtidos. Seu término é caracterizado pelo início do processo de aquecimento, quando a FCC 900 30i é ligada, aplicando uma tensão nos condutores de cobre constituintes do cabo de fibra ótica.

O cabo então é aquecido, pois ao aplicar a tensão ( $U$ ) em um condutor com resistência elétrica ( $R_{el}$ ), uma corrente ( $I$ ) é gerada no condutor. O condutor é uma resistência ôhmica,

que é aquecida através do movimento dos elétrons. A resistência elétrica do condutor pode ser calculada pela seguinte equação:

$$R_{el} = \frac{\rho_{el} \cdot L_{el}}{A_{el}} \quad 3.2$$

O fluxo de calor gerado ou também chamado de potência total ( $q$ ) se correlaciona com a capacidade da fonte de aquecimento e é o produto da tensão e corrente. O fluxo de calor que depende do comprimento ( $L_{el}$ ) do condutor é chamado ( $q_l$ ) entrada de calor.

$$q_l = \frac{q}{L_{el}} = \frac{U \cdot I}{L_{el}} = \frac{U^2}{R_{el} \cdot L_{el}} \quad 3.3$$

Após uma hora e meia de aquecimento, foi dado início à infiltração da água. Para tanto, foi utilizado um regador que manteve constante, durante todo o ensaio, uma coluna de água de 30 cm sobre a superfície do solo. A partir deste momento, a frente de umedecimento avançou, e sua movimentação pôde ser visualmente observada pelas janelas de observação do TFU, pois o contraste de cores entre a região umedecida e a região no estado inicial seca ao ar era bem caracterizado por uma coloração escura e outra mais clara, respectivamente.

A chegada da frente de umedecimento na base do TFU é caracterizada pela saída de água na válvula presente e corresponde ao término da seção de aquecimento e/ou início da seção de resfriamento. Nesse momento a FCC 900-30i é desligado.

Os sensores continuaram coletando as informações até o término da seção de resfriamento coincidente ao término do ensaio. A seção de resfriamento teve duração de uma hora.

Este processo foi realizado duas vezes e foram denominados de Ensaio 1 (E1) e Ensaio 2 (E2), sendo que no E1 a condição do solo era a de seco ao ar ao longo de toda a coluna do TFU, já no E2 o solo encontrava-se umedecido devido à realização do primeiro ensaio. Dessa forma, foi possível simular uma condição natural de campo onde novas frentes de umedecimento se manifestam com a presença de novos eventos de chuva. O tempo entre a realização do E1 e E2 foi de uma semana.

### 3.3. Análise do grau de saturação

#### 3.3.1. Desenvolvimento do modelo para simular a variação do grau de saturação

A idéia de analisar o grau de saturação do solo surgiu após a realização dos ensaios de frente de umedecimento, pois observou-se que o potencial do sistema desenvolvido não se limitava apenas a esta atividade.

Usufruindo da experiência adquirida nessa primeira fase e dos materiais presentes, rapidamente definiu-se uma metodologia para cumprir com este objetivo, que foi baseada na seguinte hipótese: uma curva de aquecimento obtida pela exposição de um determinado solo, com índice de vazios constante, a uma fonte de aquecimento que forneça calor de entrada constante, deve ser apenas influenciada pela variação do grau de saturação.

Nesse momento, necessitava-se apenas de um modelo para simular essa hipótese (Figura 3.15). Para tanto, foi utilizado um tubo de PVC com 1,00m de comprimento e 20cm de diâmetro. No alinhamento frontal deste tubo foram executados furos com 5mm de diâmetro, espaçados a cada 15cm, que tinham como objetivo limitar as camadas de compactação durante o processo de moldagem do solo.

Foram utilizadas placas de poliestireno expandido (isopor) no topo e na base do tubo para impedir que o solo entrasse em contato com o meio externo. Observa-se que o tubo não foi adaptado para fixação de sensores extras utilizados para validação da técnica, como executado no TFU. Esse modelo foi chamado de Tubo de Grau de Saturação (TGS).

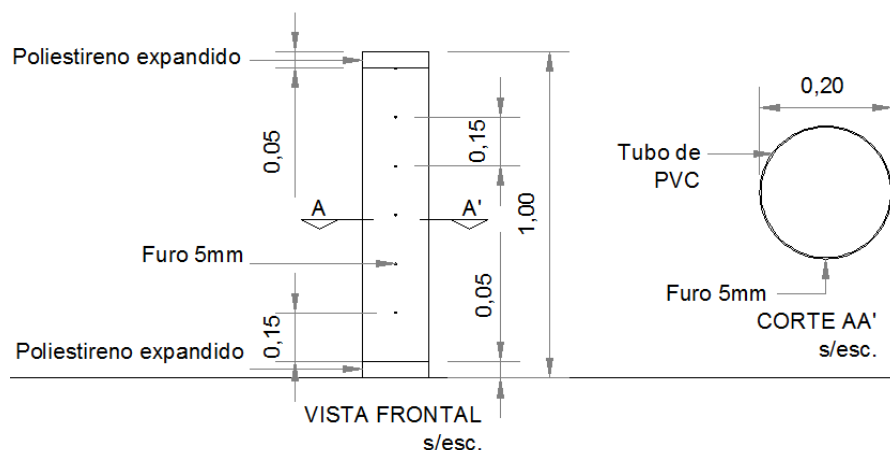


Figura 3.15. Modelo utilizado para analisar a variação do grau de saturação (TGS) (do autor).

O SHFO utilizado para avaliar a variação do grau de saturação foi alterado, substituindo a estrutura metálica por um tubo de PVC com 1m de comprimento e 10cm de diâmetro (Figura 3.16), facilitando assim a distribuição do cabo no seu entorno. Manteve-se constante o

espaçamento entre as voltas, conseqüentemente a mesma resolução foi adotada. Foi utilizado o mesmo cabo de fibra ótica empregado nos ensaios de frente de umedecimento.

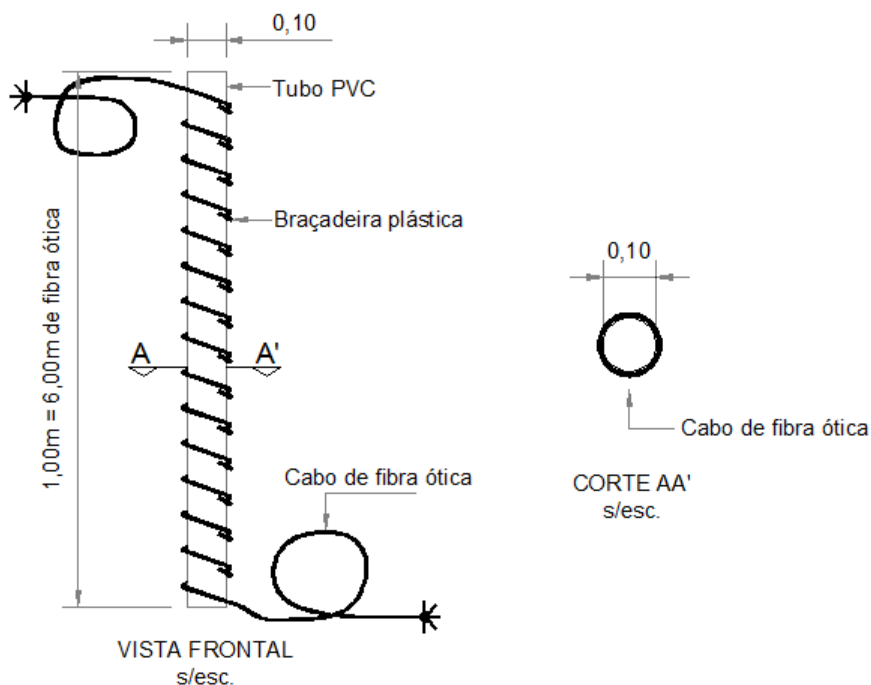


Figura 3.16. Esquema típico do SHFO empregado no ensaio (do autor).

Nesse ensaio, utilizou-se o mesmo solo caracterizado anteriormente, portanto faltava apenas definir como iríamos simular as diferentes variações de saturação. Para tanto, decidiu-se dispor 6 TGS em uma seqüência, onde cada unidade apresentaria um grau de saturação distinto em contato com o SHFO posicionado em seu interior. A partir de então se iniciou a montagem do ensaio, partindo pela distribuição do cabo de fibra ótica (Figura 3.17). Devido à forma com que a fibra foi distribuída, os TGS tiveram que ser posicionados neste momento. Estão presentes também nessa figura, dois trechos de cabo de fibra ótica que foram utilizados como referência de forma a cumprir com a mesma finalidade observada no ensaio de frente de umedecimento.

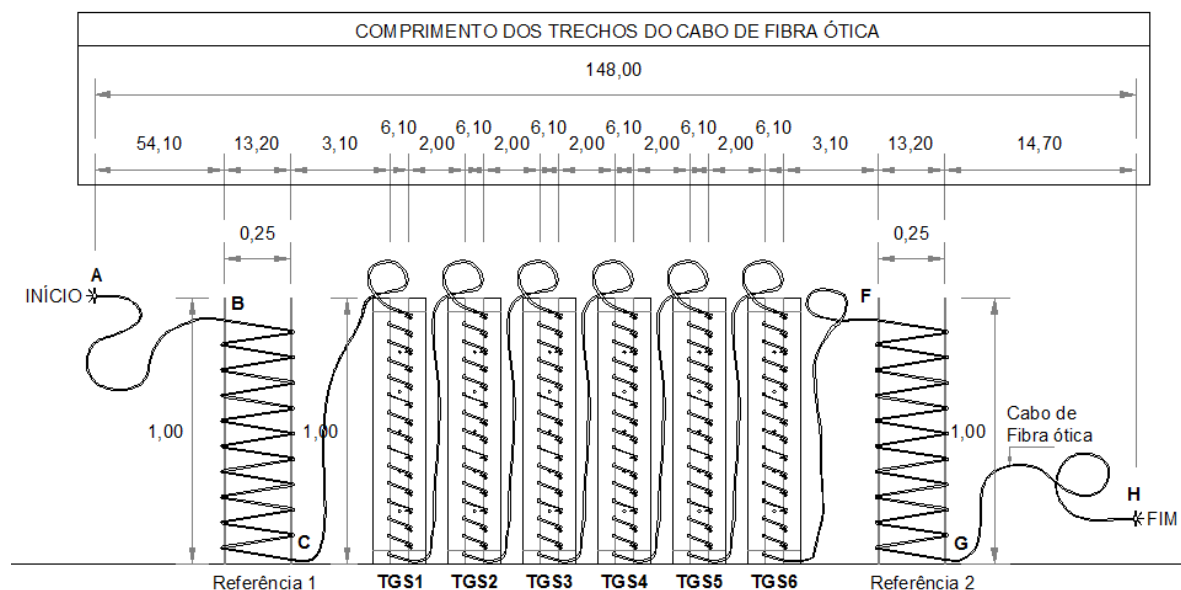


Figura 3.17. Distribuição do cabo de fibra ótica (do autor).

O próximo passo foi preencher os TGS com solo. Para tanto, determinou-se inicialmente o volume de cada unidade ( $V_{un}$ ) (Tabela 3.6). Em seguida, tendo como referência o ( $V_{un}$ ), o peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ ) e o índice de vazios ( $e$ ), foi determinado o peso de solo seco (Tabela 3.5). Como etapa final, foi determinado o grau de saturação do solo para cada unidade conforme Tabela 3.7, o que possibilitou determinar em peso a quantidade de solo e água separadamente. Como pode ser observado na Tabela 3.6, foram realizados dois ensaios denominados (EGS1 e EGS2), possibilitando a análise de um número maior de pontos ou grau de saturação.

Devido à alta permeabilidade do meio observou-se uma grande dificuldade em manter o grau de saturação constante ao longo dos os tubos com grau de saturação acima de 40%, observando-se nesses exemplares um vazamento de água na base.

Tabela 3.5. Determinação do peso de solo seco.

Índice de vazios ( $e$ )	0,8
Peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ )	2,641 ton/m <sup>3</sup>
Porosidade ( $n$ )	0,444444444
Volume de vazios de solo por unidade ( $V_v$ )	0,00936 m <sup>3</sup>
Volume de sólidos do solo por unidade ( $V_s$ )	0,01170 m <sup>3</sup>
Peso do solo seco por unidade ( $P_s$ )	30,797 kg



Tabela 3.6. Determinação do volume de solo

Descrição	Altura/comp. (h)	Diâmetro (d)	Volume (V)
Tubo 20cm	0,90 m	0,20 m	0,02827 m <sup>3</sup>
Tubo 10cm	0,90 m	0,10 m	0,00707 m <sup>3</sup>
Cabo de fibra ótica	6,00 m	0,006 m	0,00015 m <sup>3</sup>
Volume total por unidade			0,02105 m <sup>3</sup>

Tabela 3.7. Determinação do peso de solo e água para os diferentes graus de saturação

Descrição		Umidade	Grau de saturação	Peso total por unidade (kg)		Peso total por camada (kg)	
				solo	água	solo	água
EGS1	TGS1	0,30 %	0,99 %	30,797	0,092	5,148	0,015
	TGS2	6,08 %	20,00 %	30,797	1,871	5,148	0,296
	TGS3	12,15 %	40,00 %	30,797	3,743	5,148	0,608
	TGS4	18,23 %	60,00 %	30,797	5,614	5,148	0,920
	TGS5	24,31 %	80,00 %	30,797	7,485	5,148	1,232
	TGS6	9,11 %	30,00 %	30,797	2,807	5,148	0,452
EGS2	TGS1	1,52 %	5,00 %	30,797	0,468	5,148	0,063
	TGS2	3,04 %	10,00 %	30,797	0,936	5,148	0,141
	TGS3	4,56 %	15,00 %	30,797	1,404	5,148	0,219
	TGS4	7,60 %	25,00 %	30,797	2,339	5,148	0,374
	TGS5	10,63 %	35,00 %	30,797	3,275	5,148	0,530
	TGS6	13,67 %	45,00 %	30,797	4,211	5,148	0,686

### 3.3.2. Execução do ensaio

Com os quantitativos de solo e água a serem utilizados em cada unidade, foi iniciada a moldagem do solo no interior dos TGS, partindo pelo umedecimento do solo no interior de uma bandeja. Posteriormente, o TGS foi preenchido em etapas com o solo já umedecido. Cada etapa correspondia a uma camada de solo de 15cm identificada pelos furos presentes, que era compactada com o auxílio de um soquete, mantendo-se constante o número de golpes (Figura 3.18). É importante observar que não foram retiradas amostras para confirmar o índice de vazio presente após a moldagem do solo.

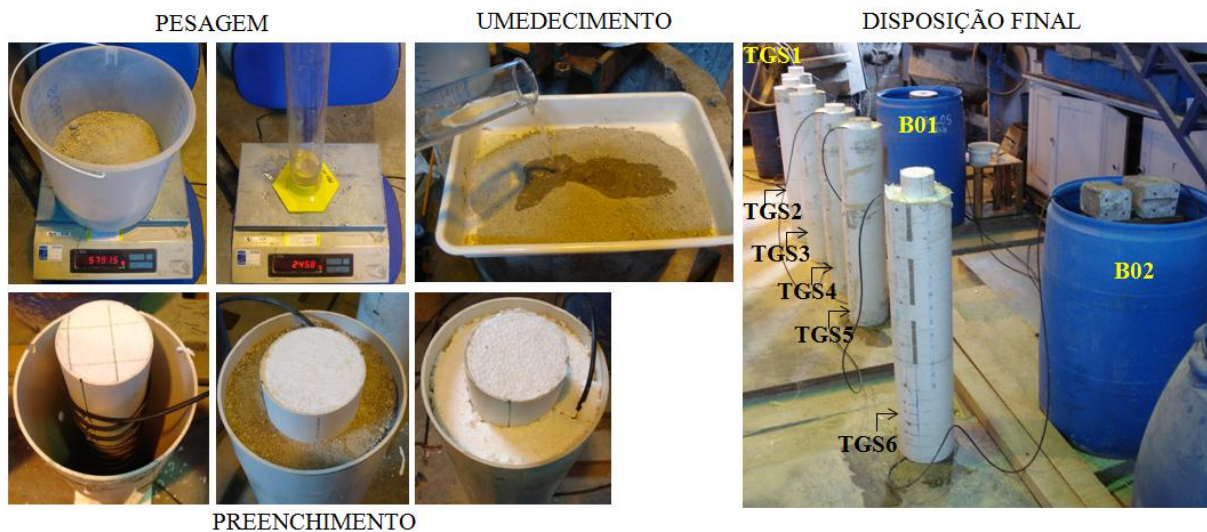


Figura 3.18. Preenchimento dos TGS (do autor).

Finalizado o preenchimento dos TGS e com os trechos de referência devidamente posicionados no interior dos barris de referência cheios d'água, foi realizada a conexão do sensor de temperatura DTS (cabo de fibra ótica) em sua unidade leitora e dos fios de cobre na FCC 900-30I, seguindo os passos executados no ensaio de frente de umedecimento. A configuração final pode ser observada na Figura 3.19.

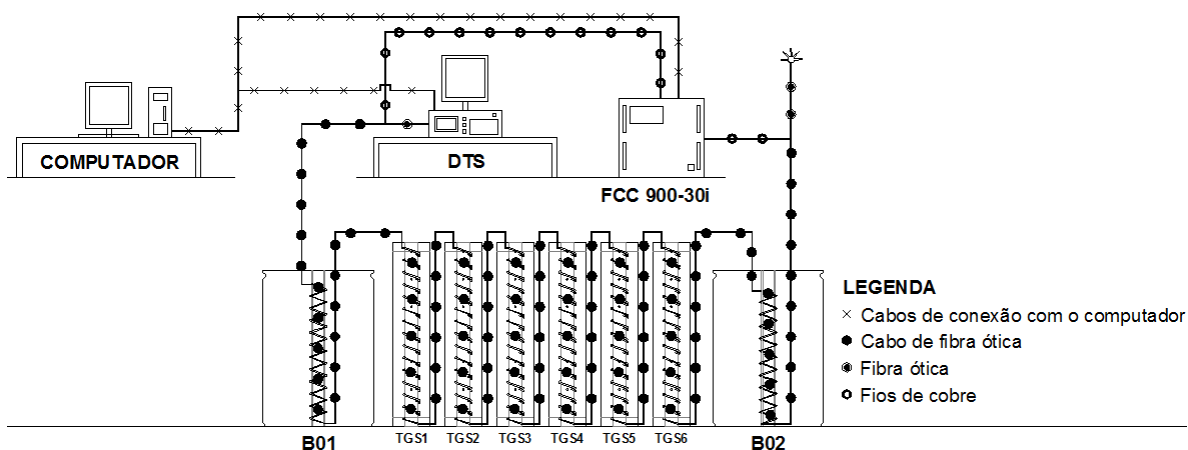


Figura 3.19. Configuração do sistema de aquisição de dados (do autor).

A configuração das unidades leitoras (DTS/FCC 900-30i) seguiu os padrões adotados no ensaio de frente de umedecimento.

Sendo assim, o passo seguinte foi executar o ensaio, também iniciado pelas leituras das primeiras informações de temperatura medidas pelo sensor DTS, que teve como duração um intervalo de tempo de 60 minutos, correspondentes à seção de referência observada nos

resultados obtidos. Seu término é caracterizado pelo início do processo de aquecimento, quando a FCC 900 -30i é ligada. A duração do período de aquecimento chamado de seção de aquecimento é de 3,5 horas. Após este período, a FCC 900-30i é desligada, iniciando o período de resfriamento denominado de seção de resfriamento, que teve duração de 1 hora.

O ensaio foi realizado em duas etapas denominadas Ensaio de Grau de Saturação 1 e 2 (EGS1 e EGS2), em cada ensaio foi possível analisar seis diferentes graus de saturação, conforme descrição apresentada na Tabela 3.6. Para cada ensaio foram realizadas duas campanhas de teste (EGS1 C1 e C2; EGS2 C1 e C2) com o objetivo de verificar sua repetibilidade, pois se entende que se mantiverem fixos os parâmetros, sejam eles, índice de vazios, grau de saturação e quantidade de calor fornecido, o comportamento das curvas de aquecimento deve ser idêntico. O intervalo entre campanhas foi de 1 dia. Observa-se que possivelmente o grau de saturação sofreu pequena alteração devido à presença de fluxo nas condições de solo não saturado.

### **3.4. Calibração dos dados**

Os dados brutos extraídos das unidades leitoras (DTS/FCC 900-30i/KYOWA/Em5b) foram gerados em arquivos no formato .txt.

Para facilitar a observação gráfica das respostas, os dados dos respectivos sensores foram compilados em um único arquivo do programa Excel para serem tratados de acordo com as etapas a seguir:

#### **3.4.1. Sensor de Temperatura – DTS**

A cada ciclo de medição, inicialmente configurado para um tempo de 2 minutos, um arquivo é gravado contendo as informações de temperatura atuante ao longo do cabo durante este período de tempo. Uma vez que cada ensaio contém numerosas leituras, as quais são gravadas em arquivos independentes, existe a necessidade de ordená-los e compilá-los em uma única planilha do Excel. Para tanto foi utilizada a ferramenta Matlab programada pelo Instituto de Hidráulica de Innsbruck – IWI, a qual ordena os dados da seguinte forma: na primeira coluna são dispostos os dados do comprimento do cabo, comum em todos os arquivos gravados. Nas colunas seguintes são informados os dados de temperatura para cada intervalo de 2 minutos. Tendo o conhecimento dos horários de início de ensaio, início do

aquecimento, início da infiltração de água, final do aquecimento e término do ensaio, é possível identificar as seções de referência, de aquecimento e resfriamento.

Segundo Perzlmaier (2007), a variação de temperatura possui uma relação linear com a mudança do calor de entrada (Figura 3.20). Sendo assim os dados de temperatura gravados pelo DTS ( $T_{bruto}$ ) devem ser ajustados caso os dados lidos pela FCC 900-30i ( $q_l$  – medido) sejam diferentes da entrada de calor inicialmente configurada para 12W/m.

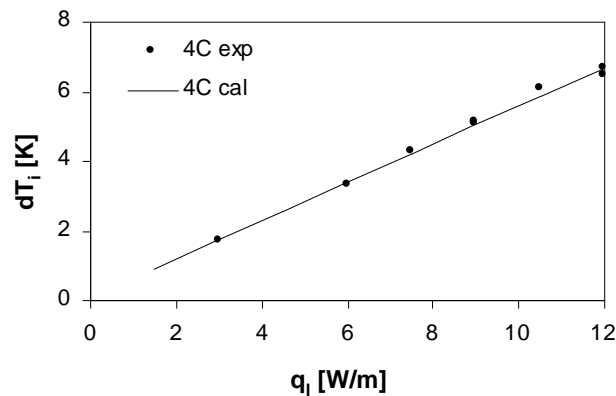


Figura 3.20. Relação linear entre o fluxo de calor ( $q_l$ ) e a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) (PERZLMAIER, 2007).

As Figuras 3.21 e 3.22 relacionam o calor de entrada ( $q_l$ ) medido, pelo tempo de execução de cada ensaio, sendo eles: frente de umedecimento e grau de saturação, respectivamente. As correções das temperaturas ( $T_{cor.}$ ) são realizadas de acordo com a Equação 3.4.

$$T_{cor.} = \frac{q_l=12W/m}{Medido} \cdot T_{bruto} \quad (\text{Eq. - 3.4})$$

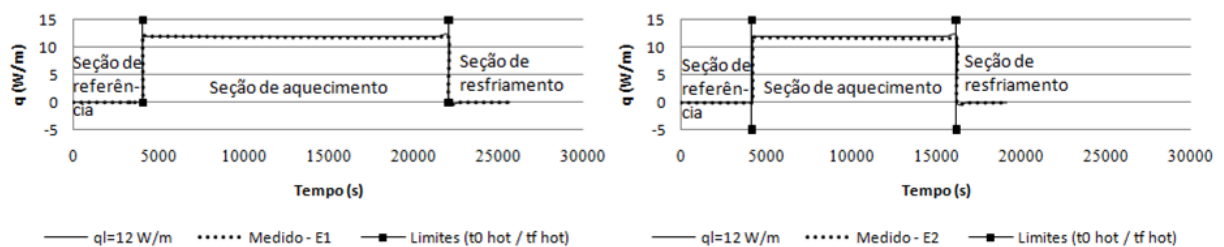


Figura 3.21. Calor de entrada medido durante os ensaios de frente de umedecimento pela FCC 900-30i.

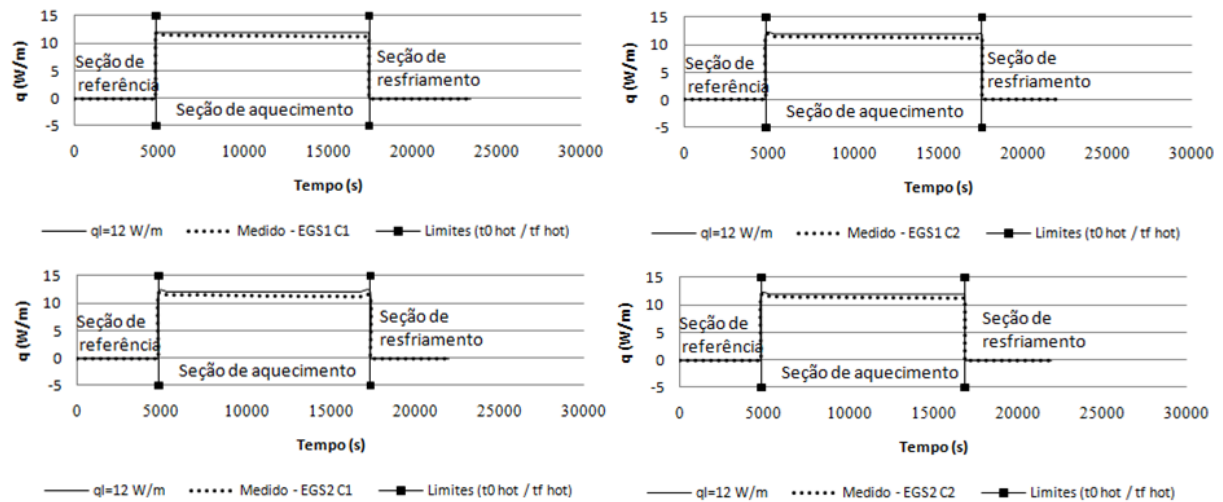


Figura 3.22. Calor de entrada medido durante os ensaios de grau de saturação pela FCC 900-30i.

### 3.4.2. Sensor de temperatura – TR

Os dados brutos gravados pela unidade leitora KYOWA foram corrigidos utilizando a Equação 3.5. Os dados lidos ( $F_0$ ), a constante de calibração ( $F$ ) e o coeficiente de temperatura ( $\beta$ ) são dependentes do sensor utilizado.

$$T_{cor.} = (F - F_0) \cdot \beta \quad (\text{Eq. - 3.5})$$

### 3.4.3. Sensor de umidade - FDR

Anteriormente à execução do ensaio de frente de umedecimento, foi realizada a calibração dos sensores FDR. Para tanto, a areia utilizada no ensaio foi moldada em 8 compartimentos, sendo o grau de saturação distinto entre eles, porém com índice de vazios de 0,60. Os dados gravados pela unidade leitora Em5b foram corrigidos utilizando as equações das retas obtidas pelas regressões lineares de cada sensor.

A Figura 3.23 e 3.24 apresentam as curvas de calibração característica para as duas unidades leitoras Em5b, denominadas radio 1 e radio 2, respectivamente.

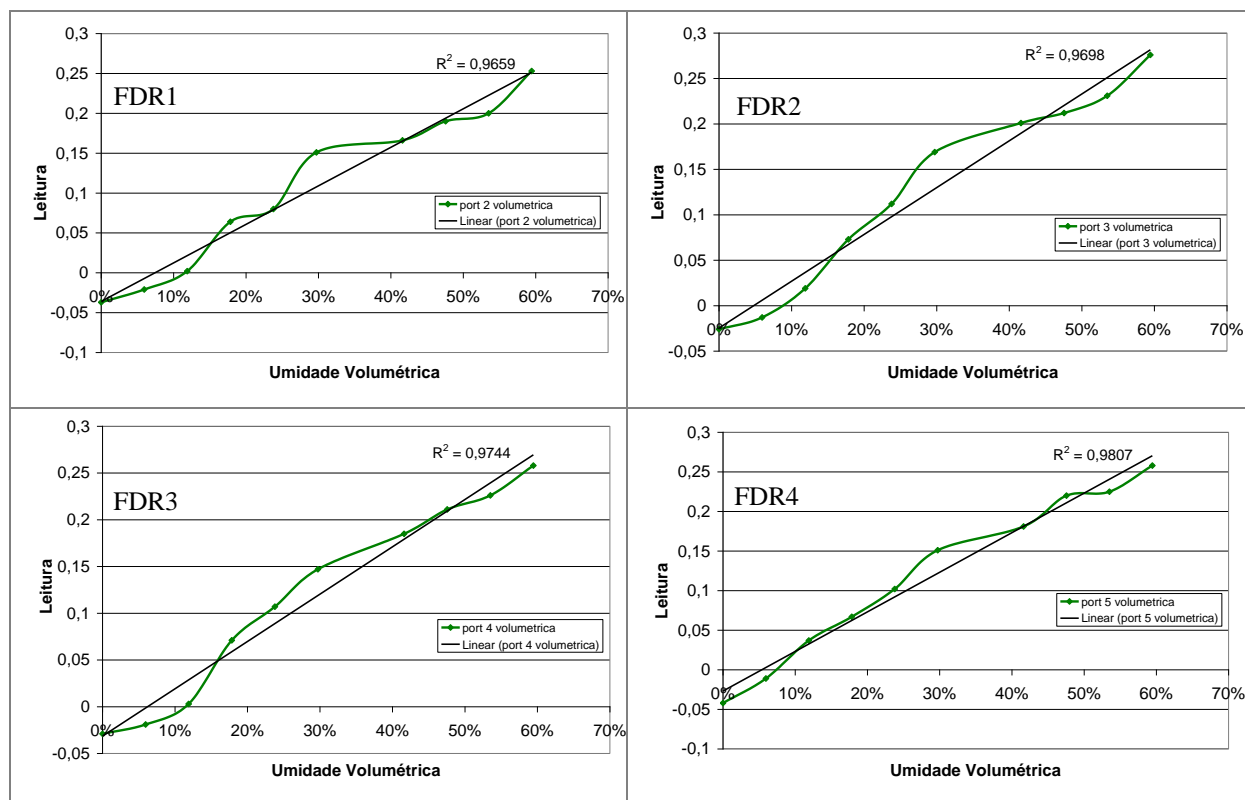


Figura 3.23. Curvas de calibração dos sensores FDR - Rádio 1

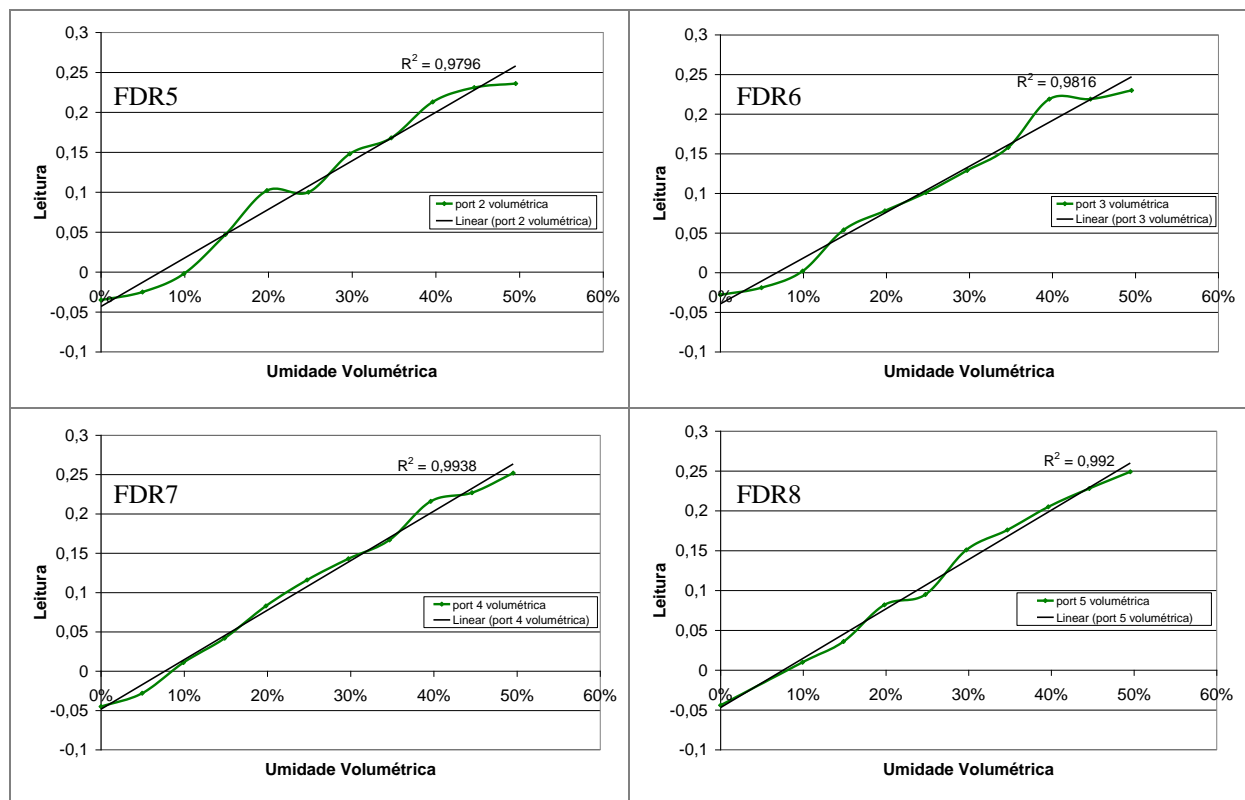


Figura 3.24. Curvas de calibração dos sensores FDR - Rádio 2

#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos pela aplicação do método do aquecimento, tanto para monitorar a frente de umedecimento, quanto para analisar o grau de saturação no solo, são predominantemente analisados através de gráficos que demonstram a evolução da propriedade medida pelo sensor, seja ela, temperatura ou umidade, ao longo do tempo.

Os limites entre as seções de referência, aquecimento e resfriamento são identificados em todos os gráficos. Cada seção corresponde a um período de tempo e seus limites são:

- Seção de referência: inicia em ( $t_0$ ) que corresponde ao início do ensaio e termina na interface com o início do aquecimento ( $t_0$  hot). Duração em torno de 1 hora;
- Seção de aquecimento: inicia em ( $t_0$  hot) e termina na interface com o início do resfriamento ( $t_f$  hot). A duração desta seção é dependente do ensaio executado, sendo para o ensaio de frente de umedecimento o tempo que a água leva para percolar o TFU do topo à base, e para o ensaio de grau de saturação o tempo foi fixado em 3,5 horas.
- Seção de resfriamento: inicia em ( $t_f$  hot) e finaliza com o término da aquisição de dados. Duração em torno de 1 hora.

Em particular, nos gráficos utilizados para o monitoramento da frente de umedecimento são acrescentadas informações que identificam o momento em que se iniciou a infiltração da água ( $t_0$  água) e que a frente de umedecimento encontrou os sensores (FU).

A Figura 4.1 ilustra a característica típica das curvas obtidas pelos diferentes sensores, seja no monitoramento da frente de umedecimento (A – esquerda) ou quando da análise do grau de saturação (B – direita).

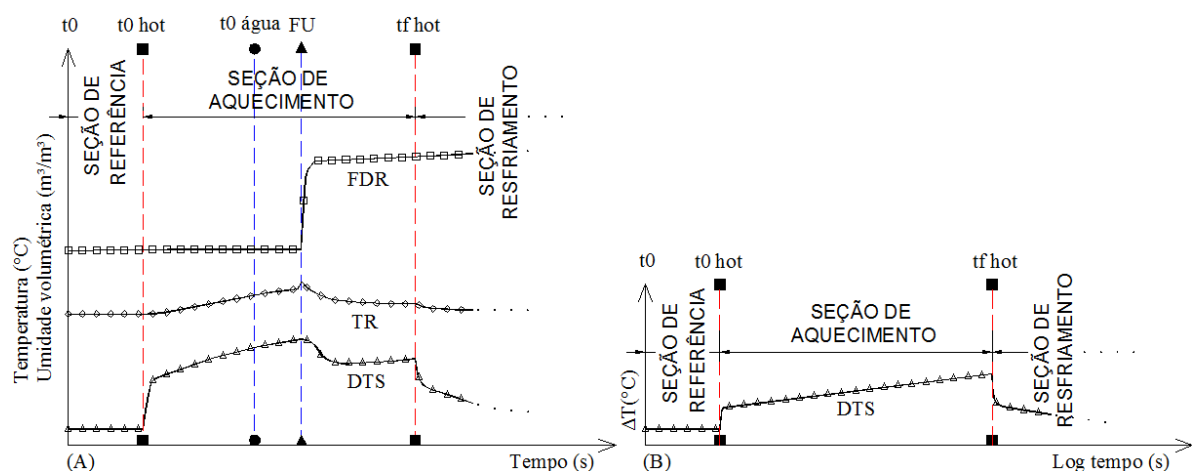


Figura 4.1. Característica típica das curvas obtidas pelos diferentes sensores, (A) frente de umedecimento e (B) grau de saturação (do autor).

#### **4.1. Monitoramento da frente de umedecimento**

Os resultados aqui expostos seguem uma sequência baseada no número de ensaios, e na condição de umidade inicial do solo. Desta forma são apresentados no primeiro momento as respostas do ensaio denominado E1, onde o solo utilizado estava seco ao ar, e em seguida as respostas do ensaio denominado E2 que apresentava o solo umedecido devido a execução do primeiro ensaio.

Para cada um dos dois ensaios são apresentados os gráficos gerados pelos sensores de umidade FDR e de temperatura TR e DTS.

De forma a validar a técnica, correlações entre os dados dos diferentes sensores foram analisadas.

##### **4.1.1. Sensores de Umidade Volumétrica – FDR**

Os FDRs identificaram o posicionamento da frente de umedecimento em E1 (Figura 4.2) e E2 (Figura 4.3), e é caracterizada nessas figuras pelo aumento repentino do teor de umidade volumétrica.

Observa-se que o tempo de infiltração da frente de umedecimento é crescente ao longo do seu avanço, comportamento este possível de ser justificado pela variação do índice de vazios ou densidade do solo, promovido pela forma com que o mesmo foi depositado no interior do tubo, onde a altura de queda foi reduzida durante seu preenchimento, como também pelo fato da infiltração ocorrer por um regime de fluxo transiente. Observa-se que a distância entre os sensores é constante.

O tempo de infiltração, tomando como referência  $t_0$  água, necessário para frente de umedecimento alcançar o sensor FDR 8, que está posicionado próximo a base do TFU, no E1 foi igual a 2h 38min 15s. Quando analisamos o E2 observamos que o tempo necessário para frente de umedecimento percorrer o mesmo caminho foi reduzido para 1h 15min 14s. Isso pode ser explicado pelo aumento de umidade do solo, o que conseqüentemente aumentou a condutividade hidráulica do meio.



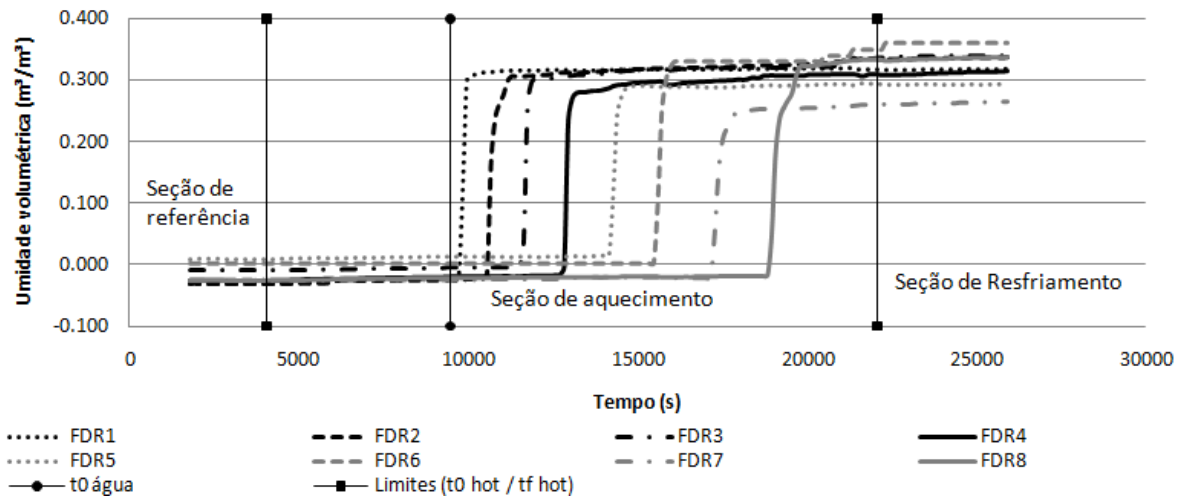


Figura 4.2. Frente de umedecimento identificada pelos sensores de umidade FDR - (E1).

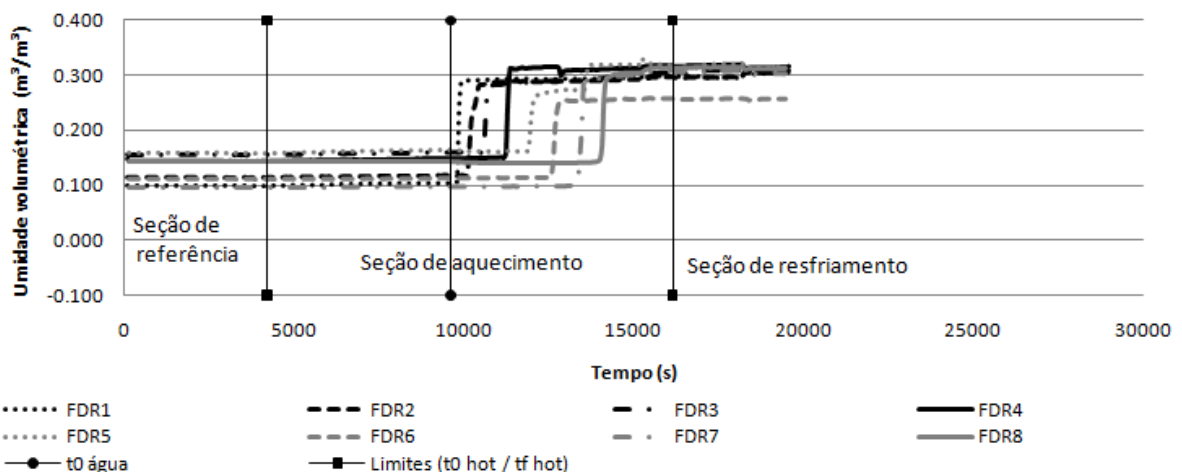


Figura 4.3. Frente de umedecimento identificada pelos sensores de umidade FDR - (E2).

#### 4.1.2. Sensores de Temperatura Resistivos – TR

Os TRs também identificaram a presença da frente em E1 (Figura 4.4) e E2 (Figura 4.5), e é representada na curva de aquecimento como um pico seguido por um decréscimo de temperatura. Como pode ser observado nessas figuras os sensores TR foram sensibilizado a partir de  $t_0$  hot devido ao calor proveniente do aquecimento da fibra.

Os sensores TR1, TR2 e TR3, estavam posicionados na mesma altura dos sensores FDR2, FDR5 e FDR8, respectivamente, e a presença da frente de umedecimento foi identificada ao mesmo tempo por cada par de sensores.

No E1 esta característica é facilmente identificada na curva de aquecimento obtida pelos três sensores. Porém, no E2 a presença da frente de umedecimento só é perceptível pelo TR1 que está mais próximo a superfície do solo. Os sensores TR2 e TR3 não foram sensibilizados pela presença da frente de umedecimento, pois a condutividade térmica do

meio no início do ensaio foi aumentada devido ao aumento da umidade inicial. Isto fez com que, o tempo necessário para os sensores alcançarem a mesma temperatura da água infiltrada, fosse menor do que o tempo necessário para a frente de umedecimento alcançá-los, anulando assim o gradiente de temperatura entre eles.

A diferença da temperatura da seção de referência entre o E1 e o E2 foi provocada pela variação natural da temperatura do ambiente, tendo em vista que os ensaios foram executados em dias diferentes.

A variação da umidade entre os ensaios alterou a condutividade térmica do meio, podendo ser observada pela inclinação da curva de aquecimento, pois quanto menor for a condutividade térmica do solo maior será a concentração de calor próximo a fonte emissora. Por este motivo as curvas do E1 possuem variação de temperatura maior para o mesmo período de tempo quando comparadas com as do E2.

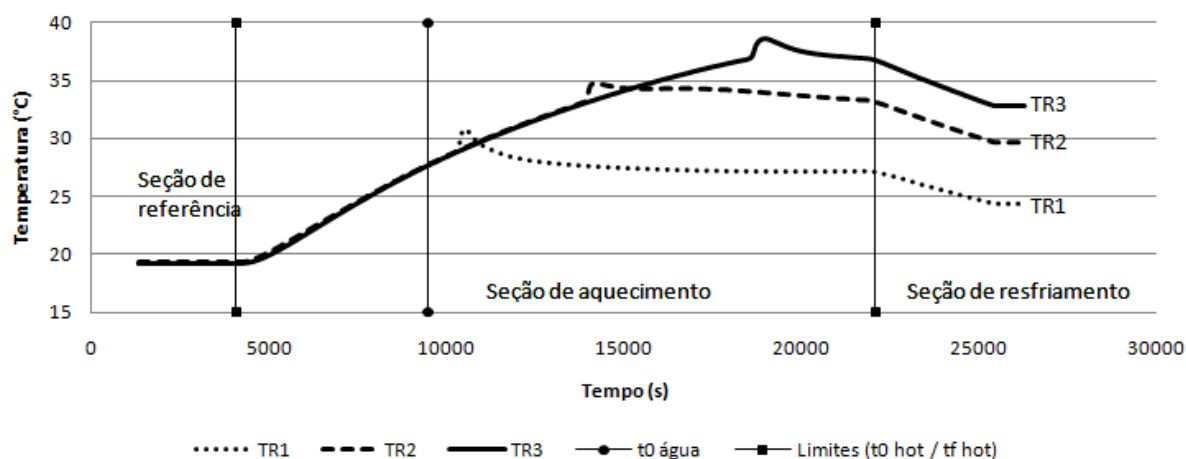


Figura 4.4. Frente de umedecimento identificada pelos sensores de temperatura TR - (E1).

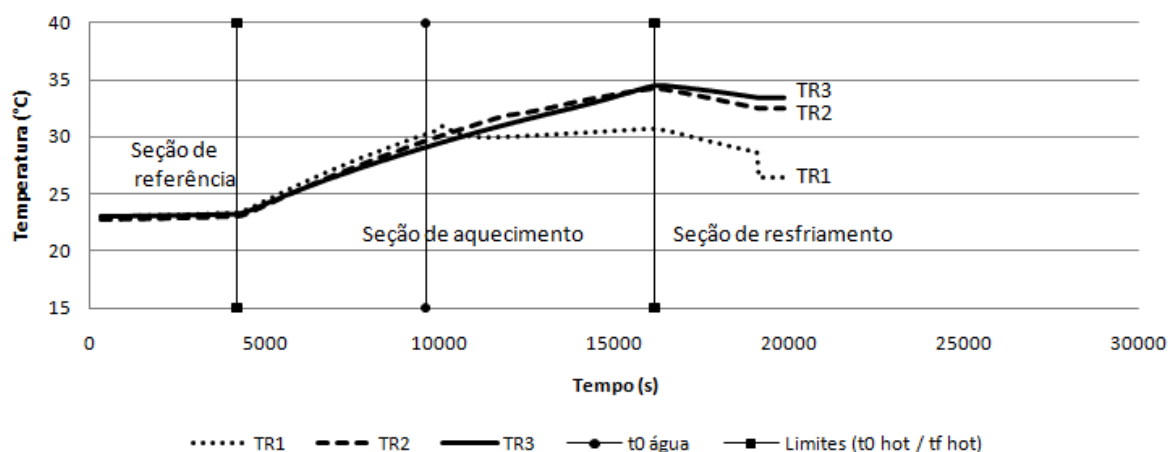


Figura 4.5. Frente de umedecimento identificada pelos sensores de temperatura TR - (E2).

#### 4.1.3. Sensores de Temperatura Distribuídos – DTS

A partir das respostas do sensor de temperatura distribuído DTS, foi possível traçar curvas de temperatura que identificaram a presença da frente de umedecimento. Elas são referentes às respostas dos trechos de fibra ótica posicionados na mesma altura dos sensores TR e FDR, e a presença da frente de umedecimento foi caracterizada pelo decréscimo da temperatura.

No E1 estes perfis podem ser perfeitamente identificados quando unidos em um único gráfico (Figura 4.6), porém no E2 (Figura 4.7) observa-se uma sobreposição das curvas, possível de ser justificada pelo fato do tempo de percolação ter sido reduzido devido ao aumento da condutividade hidráulica, como também pela redução do gradiente de temperatura entre a água e o cabo promovido pelo aumento da condutividade térmica. Isto não impediu a identificação do posicionamento da frente de umedecimento, porém a variação de temperatura foi suavizada.

O número de respostas possíveis de serem obtidas é dependente da resolução do equipamento e da forma com que a mesma foi distribuída. Para a configuração utilizada é possível obter curvas de temperatura a cada 16,7cm de altura, ou seja, um sensor a cada 16,7cm de altura.

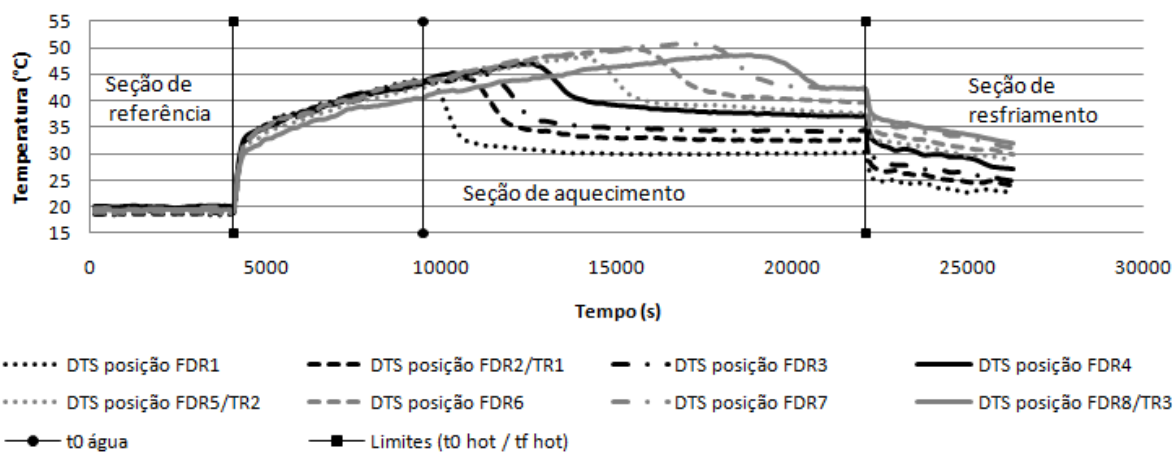


Figura 4.6. Frente de umedecimento identificada pelo sensor distribuído DTS - (E1).

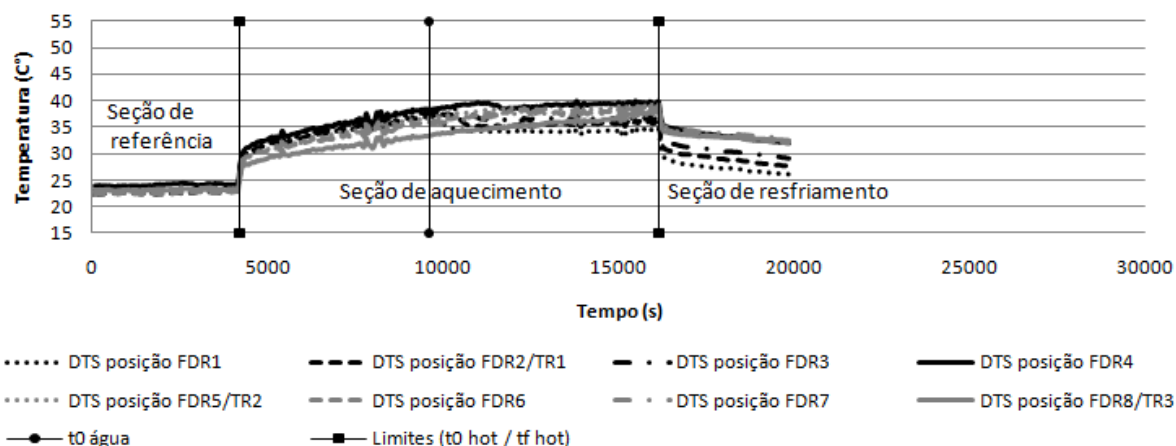


Figura 4.7. Frente de umedecimento identificada pelo sensor distribuído DTS - (E2).

Quando analisamos a temperatura ao longo de todo o comprimento do cabo de fibra ótica, durante tempos distintos e que antecedem o  $t_0$  água, diferentes perfis de temperatura são caracterizados. Isto se deve as propriedades térmicas do material analisado.

A Figura 4.8 nos mostra perfis de temperatura obtidos no E1 e E2. Observamos que anteriormente ao início do aquecimento, exatamente 10 minutos antes do  $t_0$  hot, o perfil de temperatura ao longo do comprimento do cabo é representado por uma linha reta e horizontal, o que nos indica a homogeneidade de temperatura entre os meios. Quando analisamos este perfil 45 minutos após  $t_0$  hot, a linearidade vista anteriormente é substituída por seções com temperaturas variáveis entre elas. Cada seção corresponde a um ambiente distinto e o trecho de cada seção apresenta temperatura linear e horizontal, com exceção dos trechos no ar, pois sua distribuição deixou a fibra em contato com diferentes superfícies, e do trecho no solo, pois a variação da densidade do meio ao longo do comprimento do TFU influenciou na sua condutividade térmica.

A sobreposição das curvas obtidas no E1 e E2 se fez presente em todos os ambientes, com exceção do trecho dentro do solo. Isto se deve a variação de umidade entre os ensaios, provocando assim a variação da condutividade térmica do meio.

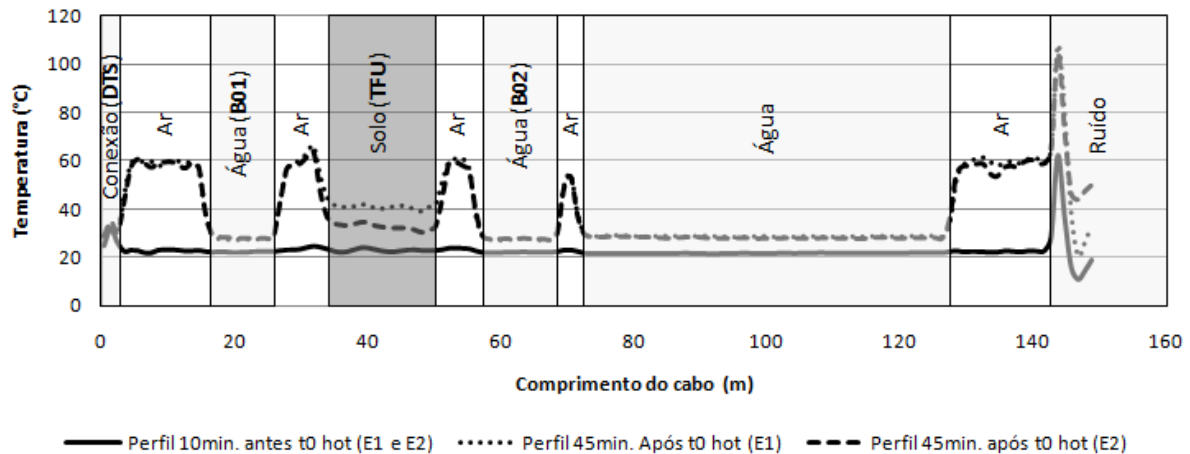


Figura 4.8. Influência da densidade e umidade na condutividade térmica do solo.

#### 4.1.4. Correlação dos dados

As correlações entre os sensores FDR, TR e os respectivos trechos de cabo de fibra ótica DTS posicionados na mesma altura, foram realizadas. A resposta do sensor DTS na identificação da frente de umedecimento acontece perfeitamente no mesmo instante em que os sensores FDR e TR a detectaram, porém a variação de temperatura da fibra, caracterizada pela presença da frente de umedecimento é suavizada durante seu avanço. Esta característica possivelmente acontece pelo fato da água receber calor proveniente dos fios de cobre integrados ao cabo de fibra ótica durante sua infiltração, conseqüentemente o gradiente de temperatura entre eles é reduzido.

As Figuras 4.9 até 4.11 representam as respostas obtidas no E1, na posição (TR1/FDR2; TR2/FDR5; TR3/FDR8).

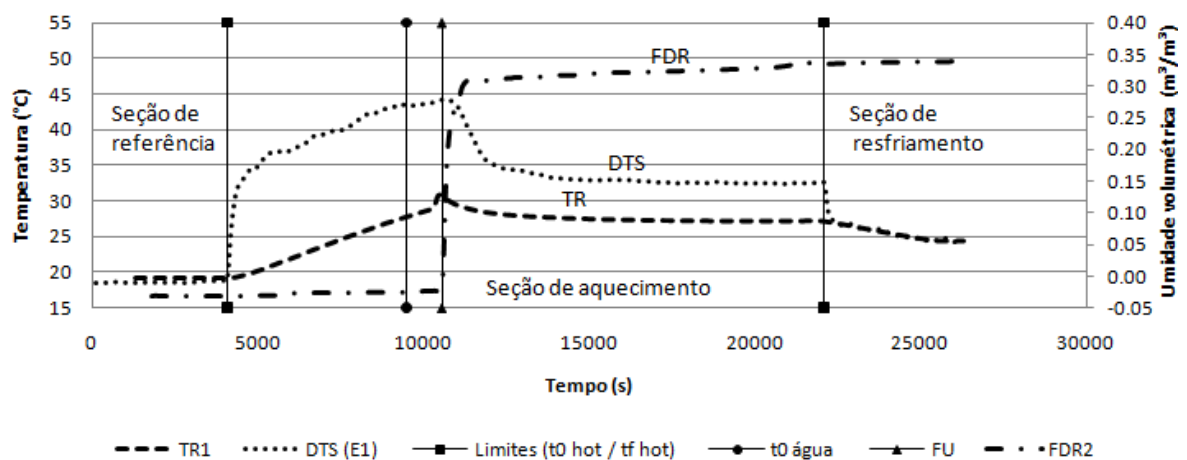


Figura 4.9 Frente de umedecimento – Correlação entre FDR2, TR1 e DTS - (E1).

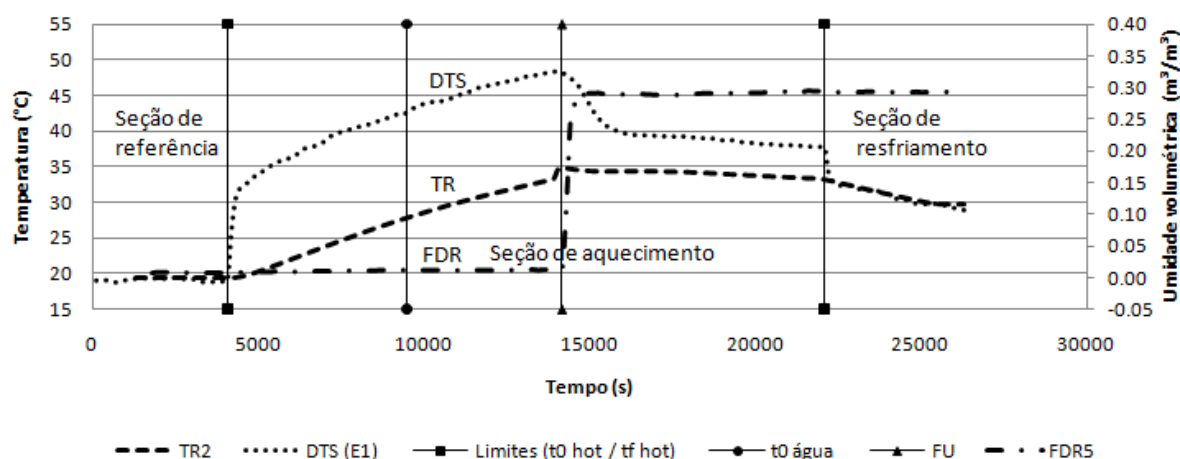


Figura 4.10. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR5, TR2 e DTS – (E1).

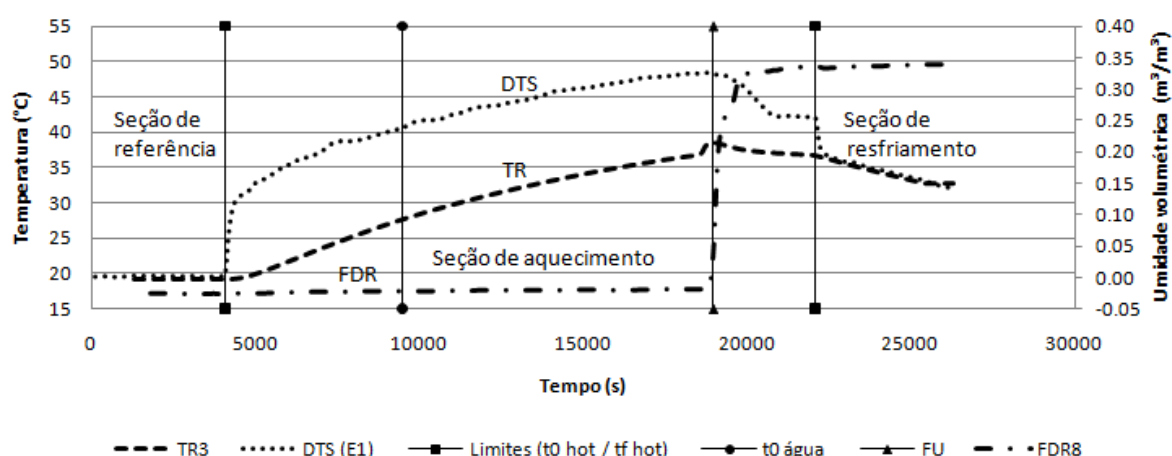


Figura 4.11. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR8, TR3 e DTS – (E1).

Após a realização do E2 as correlações entre os sensores foram realizadas conforme pode ser observado nas Figuras 4.12 até 4.14. A estas figuras foram acrescentados os resultados obtidos com o DTS no E1, destacando o posicionamento da frente de umedecimento de forma a facilitar a observação da variação do tempo de chegada entre os ensaios. Observa-se que são curvas obtidas no mesmo trecho, porém expostos a diferentes umidades.

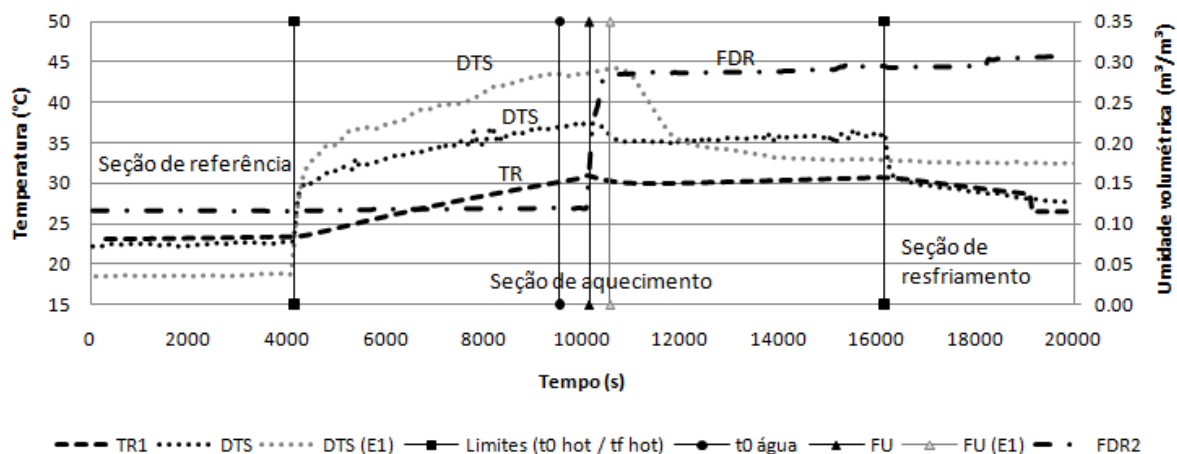


Figura 4.12. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR2, TR1 e DTS - (E2).

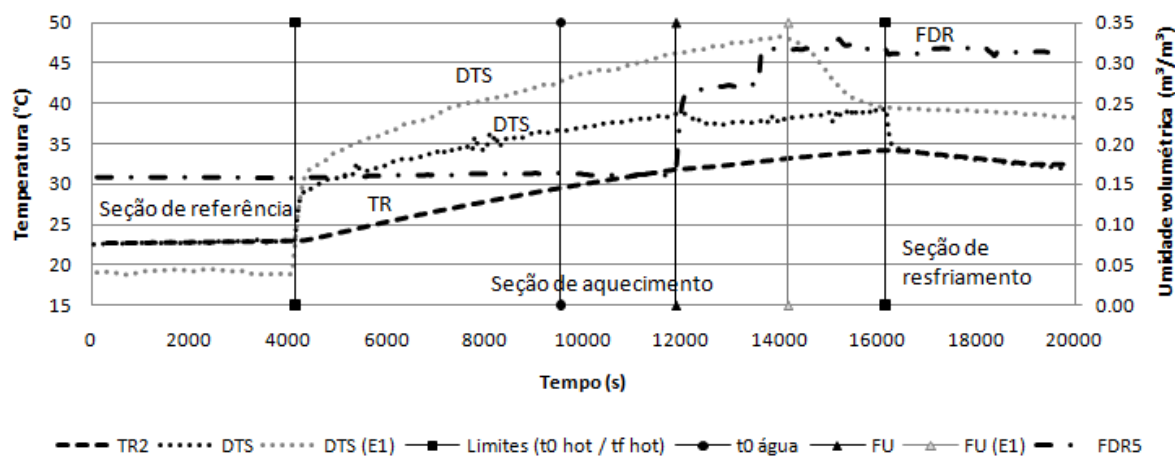


Figura 4.13. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR5, TR2 e DTS - (E2).

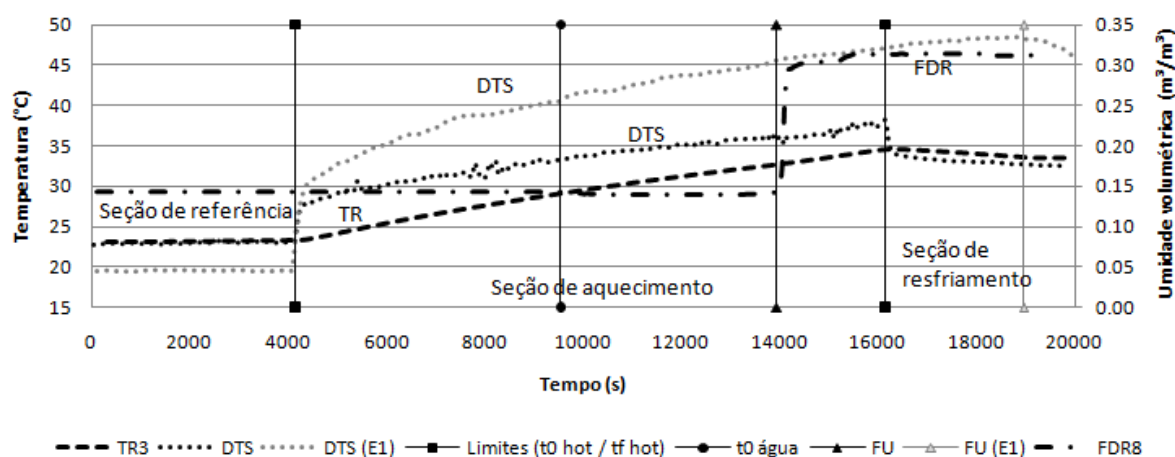


Figura 4.14. Frente de umedecimento – Correlação entre FDR8, TR3 e DTS - (E2).

As Tabelas 4.1 e 4.2 discriminam os principais horários dos ensaios. Nelas os valores de tempo absoluto correspondem ao horário registrado no equipamento DTS. Os valores

acumulados tomam como referência o início do ensaio  $t_0$ . É possível observar também os horários de chegada da frente de umedecimento nos respectivos sensores tomando como referência o início do ensaio  $t_0$ , início do aquecimento  $t_0$  hot e início da infiltração da água  $t_0$  água, além de demonstrar o tempo de avanço da frente entre os sensores. O tempo de ensaio para cada seção seja ela: referência, aquecimento ou resfriamento, também pode ser observado.

Tabela 4.1. Determinação dos horários da frente de umedecimento – (E1)

Descrição	Horário		Frente de umedecimento					
	Absoluto	Acumulado	Sensor	Absoluto	$t_0$	$t_0$ hot	$t_0$ água	Entre sensores
Início do ensaio ( $t_0$ )	18:22:42	00:00:00	FDR1/DTS	21:02:59	02:40:17	01:34:10	00:04:00	Topo/1 - 00:04:00
Início aquecimento ( $t_0$ hot)	19:28:49	01:06:07	FDR2/TR1/DTS	21:17:01	02:54:19	01:48:12	00:18:02	1/2 - 00:14:02
Início infiltração da água ( $t_0$ água)	20:58:59	02:36:17	FDR3/DTS	21:33:02	03:10:20	02:04:13	00:34:03	2/3 - 00:16:01
Fim aquecimento (tf hot)	00:29:21	06:06:39	FDR4/DTS	21:55:05	03:32:23	02:26:16	00:56:06	3/4 - 00:22:03
Fim do ensaio (tf)	01:39:27	07:16:45	FDR5/TR2/DTS	22:17:07	03:54:25	02:48:18	01:18:08	4/5 - 00:22:02
Seção de referência		01:06:07	FDR6/DTS	22:41:09	04:18:27	03:12:20	01:42:10	5/6 - 00:24:02
Seção de aquecimento		05:00:32	FDR7/DTS	23:07:12	04:44:30	03:38:23	02:08:13	6/7 - 00:26:03
Seção de resfriamento		01:10:06	FDR8/TR3/DTS	23:37:14	05:14:32	04:08:25	02:38:15	7/8 - 00:30:02

Tabela 4.2. Determinação dos horários da frente de umedecimento – (E2)

Descrição	Horário		Sensor	Frente de umedecimento				
	Absoluto	Acumulado		Absoluto	$t_0$	$t_0$ hot	$t_0$ água	Entre sensores
Início do ensaio ( $t_0$ )	15:08:16	00:00:00	FDR1/DTS	17:50:49	02:42:33	01:33:20	00:04:01	Topo/1 - 00:04:01
Início aquecimento ( $t_0$ hot)	16:17:29	01:06:13	FDR2/TR1/DTS	17:56:51	02:48:35	01:39:22	00:10:03	1/2 - 00:06:02
Início infiltração da água ( $t_0$ água)	17:46:48	02:36:32	FDR3/DTS	18:03:52	02:55:36	01:46:23	00:17:04	2/3 - 00:07:01
Fim aquecimento (tf hot)	19:37:09	04:26:53	FDR4/DTS	18:14:52	03:06:36	01:57:23	00:28:04	3/4 - 00:11:00
Fim do ensaio (tf)	20:42:24	05:34:08	FDR5/TR2/DTS	18:25:56	03:17:40	02:08:27	00:39:08	4/5 - 00:11:04
Seção de referência		01:06:13	FDR6/DTS	18:37:58	03:29:42	02:20:29	00:51:10	5/6 - 00:12:02
Seção de aquecimento		03:19:40	FDR7/DTS	18:50:01	03:41:45	02:32:32	01:03:13	6/7 - 00:12:03
Seção de resfriamento		01:05:15	FDR8/TR3/DTS	19:02:02	03:53:46	02:44:33	01:15:14	7/8 - 00:12:01

Ao analisarmos a evolução dos dados gerados por um trecho do cabo de fibra ótica nos ensaios E1 e E2, considerando o tempo em escala logarítmica, curvas com comportamentos distintos de temperatura são observadas (Figura 4.15).

Essa mudança de comportamento se deve ao fato da condutividade térmica ser alterada pela variação do grau de saturação.



A partir de então se inicia a apresentação do segundo objetivo desta dissertação, que visa analisar o grau de saturação através da análise do comportamento das curvas de aquecimento.

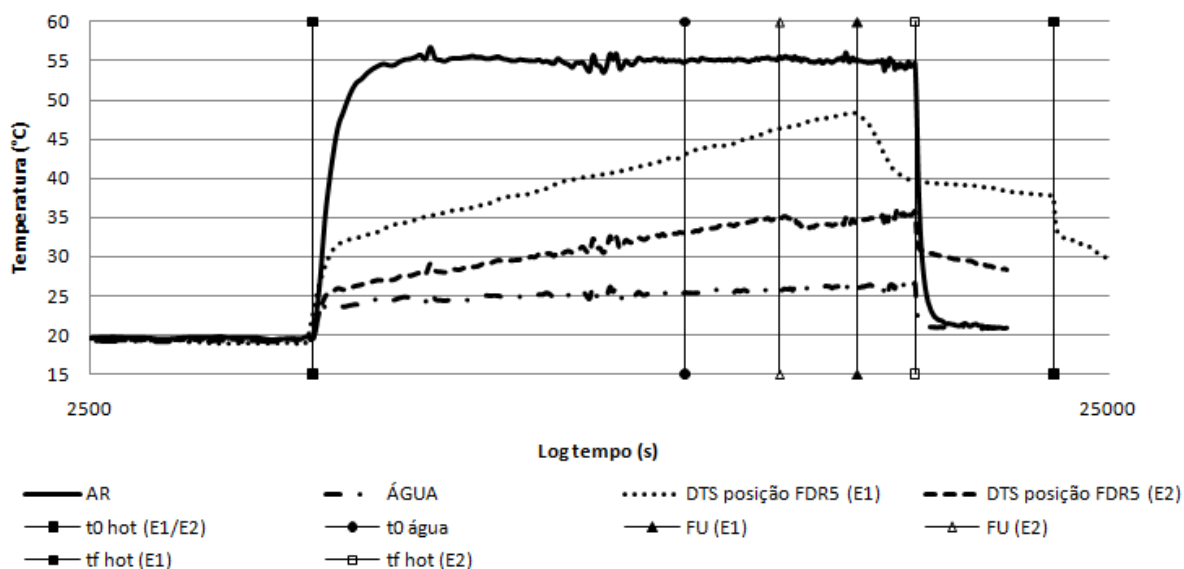


Figura 4.15. Características das curvas de aquecimento geradas no mesmo ponto (FDR5), sob diferentes graus de saturação.

## 4.2. Análise do grau de saturação

A análise do grau de saturação se fez pela evolução da curva de aquecimento gerada para os diferentes graus de saturação.

Para tanto, foram realizados dois ensaios, em cada ensaio trechos de 6m de fibra foram expostos em contato com 6 diferentes graus de saturação, sendo eles:

- Ensaio 1 (EGS1): 0%, 20%; 30%; 40%; 60%, 80%;
- Ensaio 2 (EGS2): 5%, 10%, 15%, 25%, 35%, 45%.

Os valores de temperatura obtidos nas curvas de aquecimento não são absolutos e sim as variações referentes à média de temperatura obtida durante a seção de referência.

Em todas as figuras geradas estão presentes de forma complementar as respostas da fibra exposta a meios de baixa e alta condutividade térmica, sendo eles ar e água respectivamente.

#### 4.2.1. Determinação das curvas de aquecimento – Ensaio 1 (EGS1)

Diferentes curvas de aquecimento foram caracterizadas devido à mudança do grau de saturação. Nas Figuras 4.16 e 4.17 são apresentados os resultados obtidos para o solo com 0% e 80% de grau de saturação, respectivamente. Sendo esses os respectivos limites mínimos e máximos ensaiados. Nelas é possível observar também a contraprova obtida na campanha C2, um dia após a realização da campanha C1. O comportamento das duas curvas é semelhante, porém não idêntico devido à possível variação do grau de saturação.

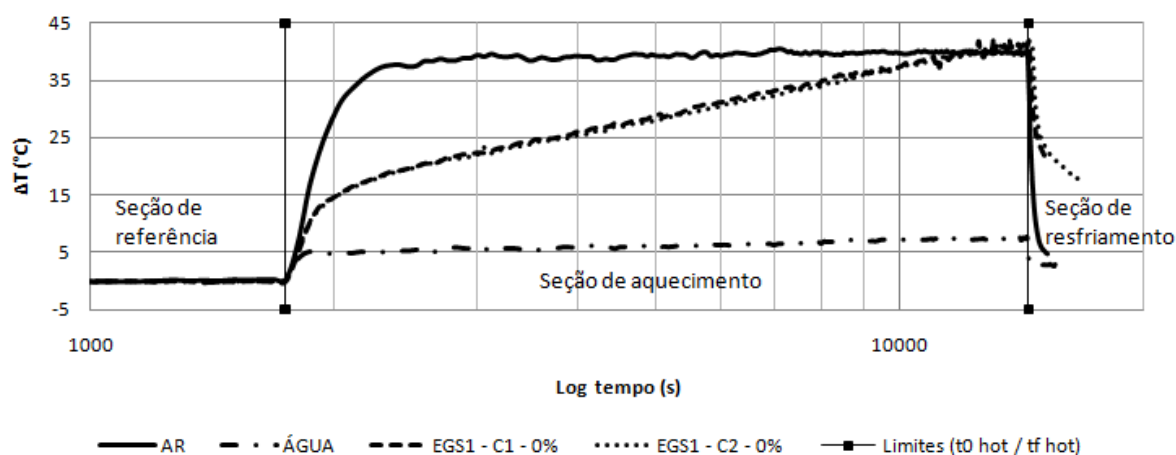


Figura 4.16. Curva de aquecimento para solo com 0% de grau de saturação – (EGS1 – C1 e C2)

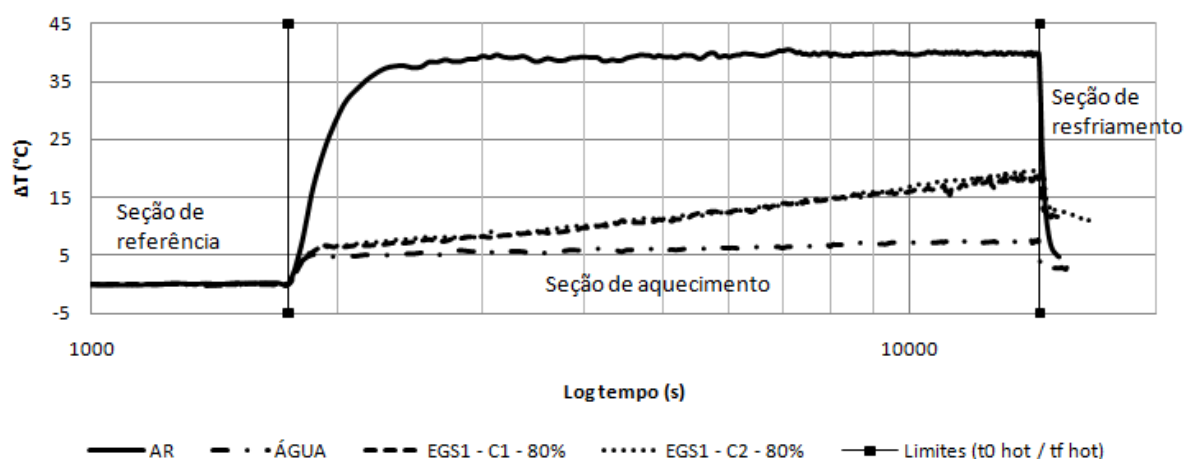


Figura 4.17. Curva de aquecimento para o solo com 80% de grau de saturação – (EGS1 – C1 e C2).

Ao se analisarem as curvas obtidas para os 6 diferentes graus de saturação, ver figura 4.18 e 4.19, observou-se uma grande diferença na resposta do aquecimento entre o solo com

0% e 20% de grau de saturação. As curvas entre 20% e 80% de grau de saturação apresentam comportamentos distintos, porém com pequenas variações entre elas.

#### 4.2.1.1. Campanha 1 (C1)

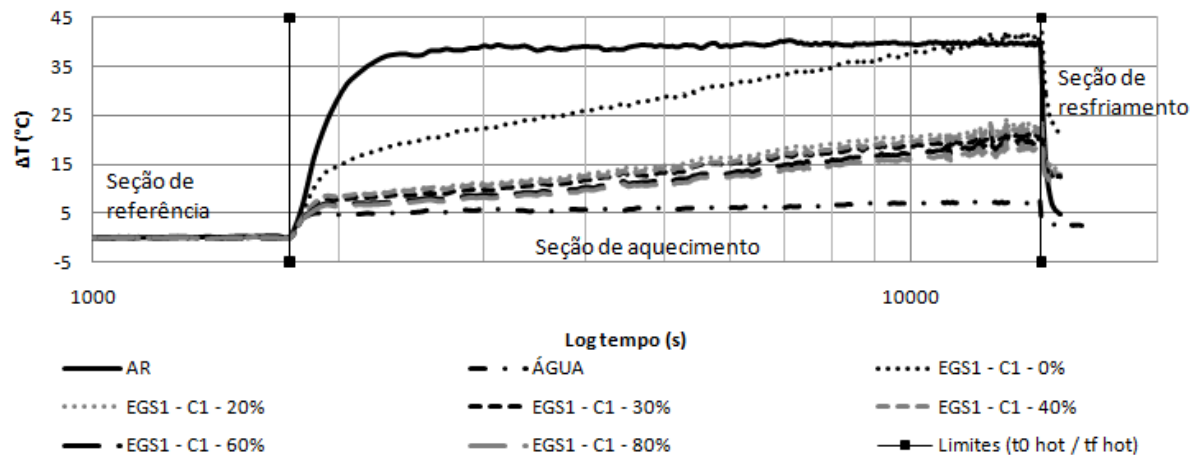


Figura 4.18. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação – (EGS1 – C1).

#### 4.2.1.2. Campanha 2 (C2)

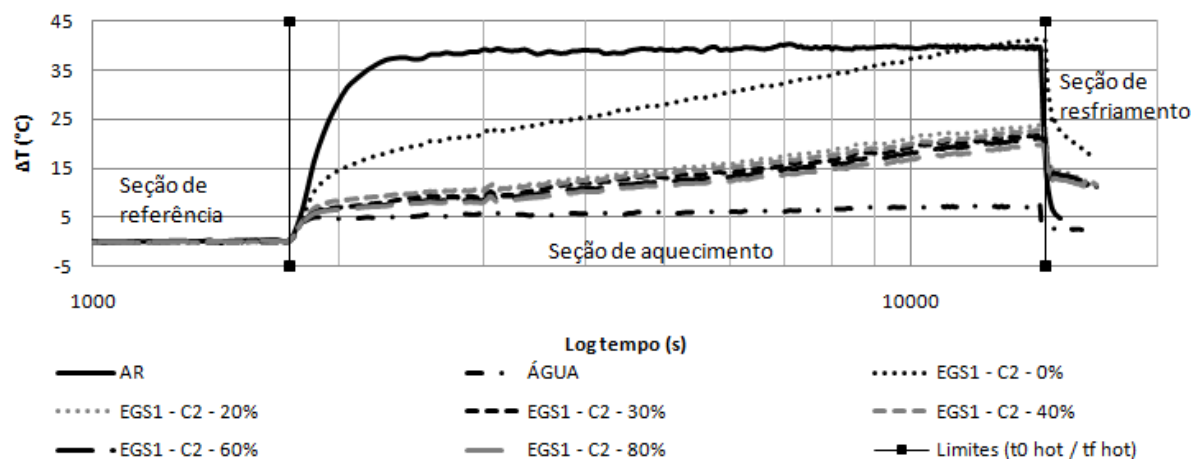


Figura 4.19. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação – (EGS1 – C2)

#### 4.2.2. Determinação das curvas de aquecimento – Ensaio 2 (EGS2)

O EGS2 foi realizado de forma a aumentar o número de pontos ou curvas de aquecimento entre os pontos já obtidos. Sendo assim, variações com passo de 5% de acréscimo do grau de saturação foram realizadas. Com o mesmo objetivo do EGS1, sobreposições de curvas para o mesmo grau de saturação foram realizadas, desta vez para os

valores de 5% e 45%, sendo estes os limites mínimos e máximos respectivamente testados neste ensaio. As respostas obtidas também foram semelhantes, ver Figuras 4.20 e 4.21.

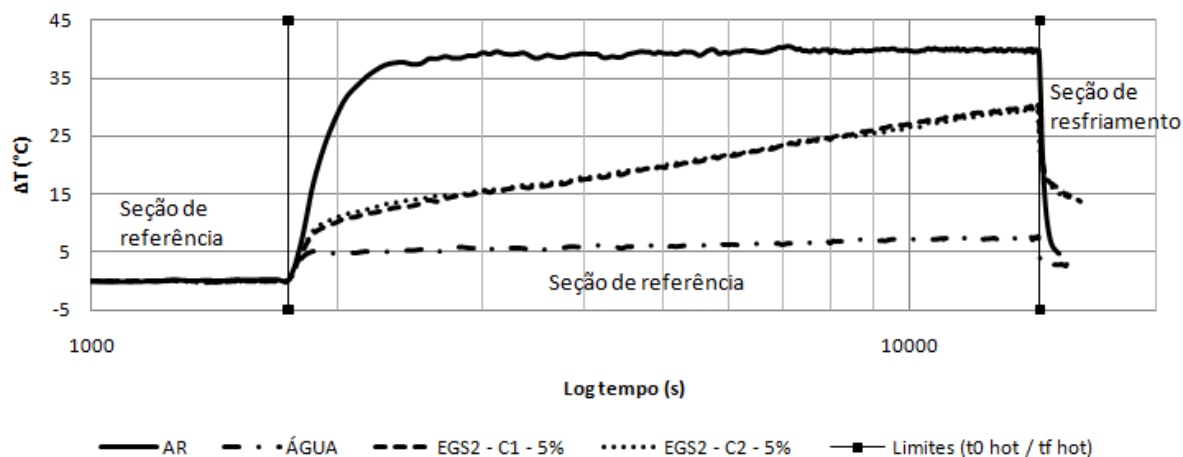


Figura 4.20. Curva de aquecimento para solo com 5% de grau de saturação – (EGS2 – C1 e C2).

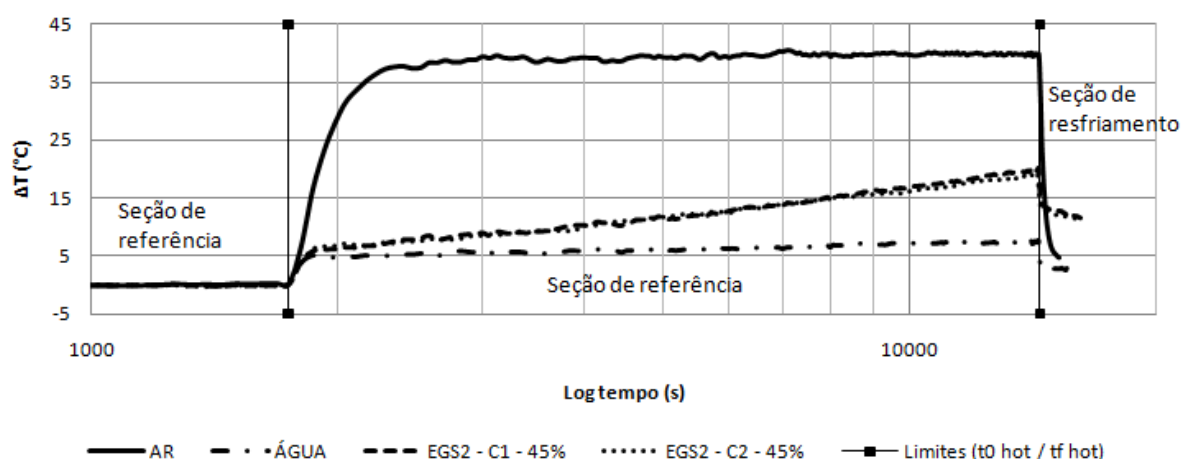


Figura 4.21. Curva de aquecimento para solo com 45% de grau de saturação – (EGS2 – C1 e C2).

Ao se analisarem as curvas obtidas para os 6 diferentes graus de saturação, ver figura 4.22 e 4.23, observamos comportamentos distintos entre elas, com tendência a reduzirem a variação de temperatura ao longo do tempo a medida em que se aumenta o grau de saturação.

#### 4.2.2.1. Campanha 1 (C1)

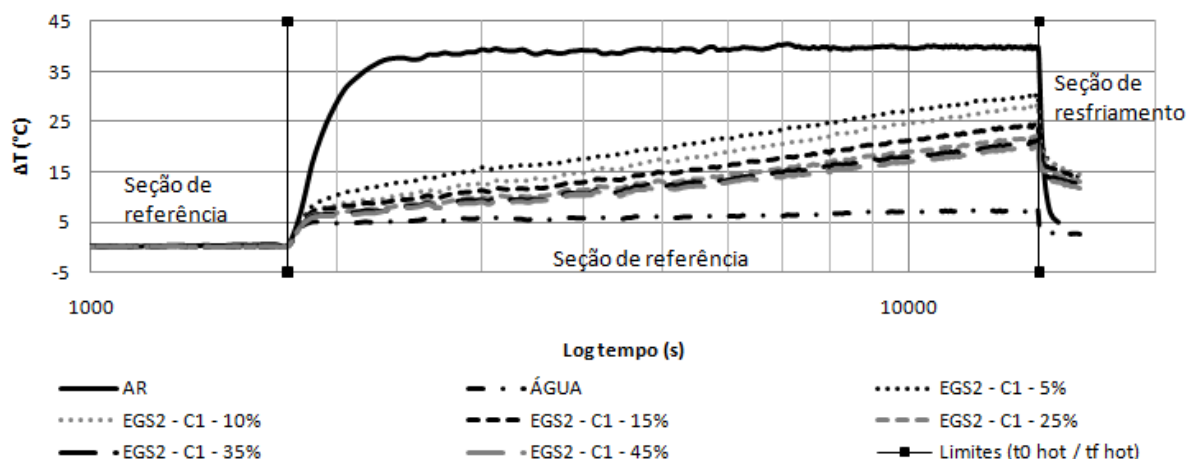


Figura 4.22. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação – (EGS2 – C1).

#### 4.2.2.2. Campanha 2 (C2)

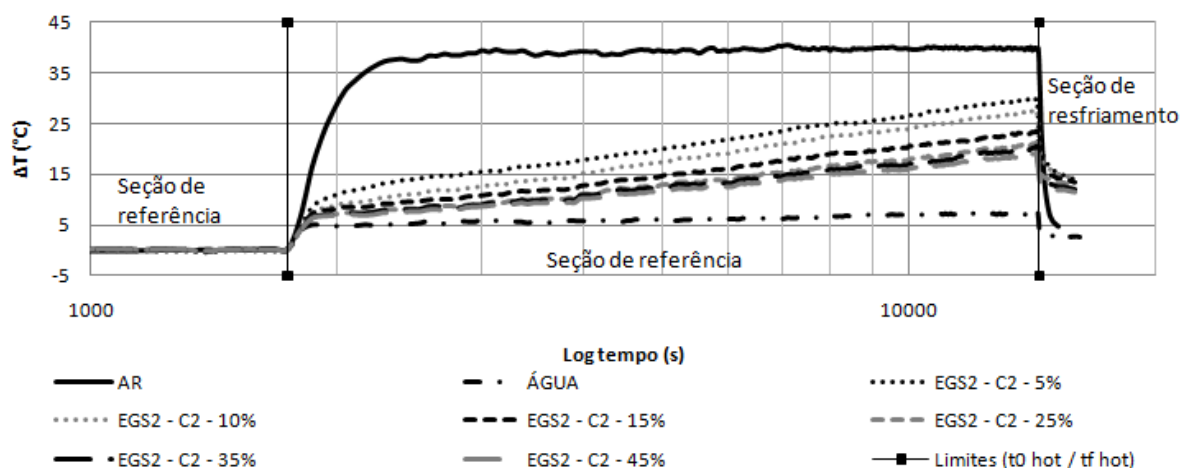


Figura 4.23. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação – (EGS2 – C2).

#### 4.2.2.3. Correlação dos dados

Quando correlacionamos os dados dos dois ensaios (EGS1 e EGS2) (Figura 4.24), observou-se que se pode obter um leque de curvas, e que este leque de curvas é característico para o solo ensaiado, onde manteve-se fixo o índice de vazios e a quantidade de calor transmitida para o solo, variando apenas o valor do grau de saturação.

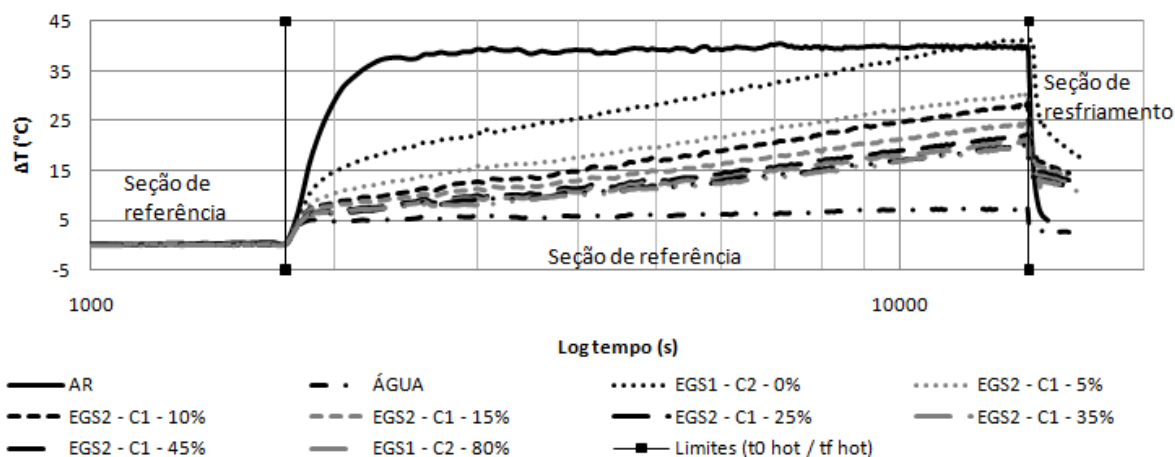


Figura 4.24. Curvas de aquecimento obtidas para os diferentes graus de saturação nos diferentes ensaios EGS1 e EGS2.

#### 4.2.3. Análise da condutividade térmica

A condutividade térmica foi determinada a partir da utilização do modelo de Kristiansen, o qual a determina baseando-se nas curvas de aquecimento obtidas (Figura 4.26), porém seus valores não puderam ser validados em função de não possuir equipamento específico para sua determinação, como também não possuir os parâmetros utilizados no modelo de Johansen que visa determinar esta propriedade.

Essa validação se faz de fundamental importância tendo em vista que ao analisarmos o acréscimo de temperatura gerado pela fibra distribuída em forma de helicóide utilizando o modelo de Kristiansen (1982) citado por Goltz e Aufleger (2009) observamos um aumento de temperatura mais acentuado quando comparado com a resposta teórica e com os dados obtidos pelo Instituto de Hidráulica IWI da Universidade de Innsbruck, onde a fibra foi disposta linearmente no interior de um solo saturado que ocupava um ambiente com dimensões que simulavam condições de contorno previstas no modelo (Figura 4.25). Este comportamento pode ser justificado tanto pela influência térmica de um cabo sobre o outro devido à proximidade do espaçamento entre eles, quanto pela limitação geométrica do modelo que não simula as condições de meio infinito nas quais a teoria se baseia.

Independente de sua validação as respostas obtidas na Figura 4.26 são coerentes, partindo do princípio de que quanto maior for o grau de saturação do solo maior será sua condutividade térmica.

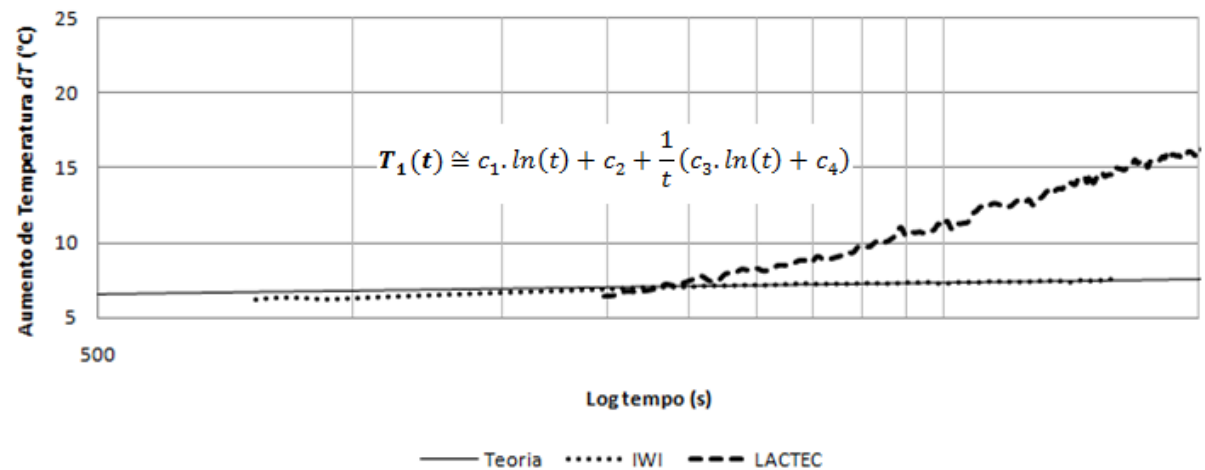


Figura 4.25. Variação da resposta de temperatura em função da disposição do cabo de fibra ótica em forma de helicóide.

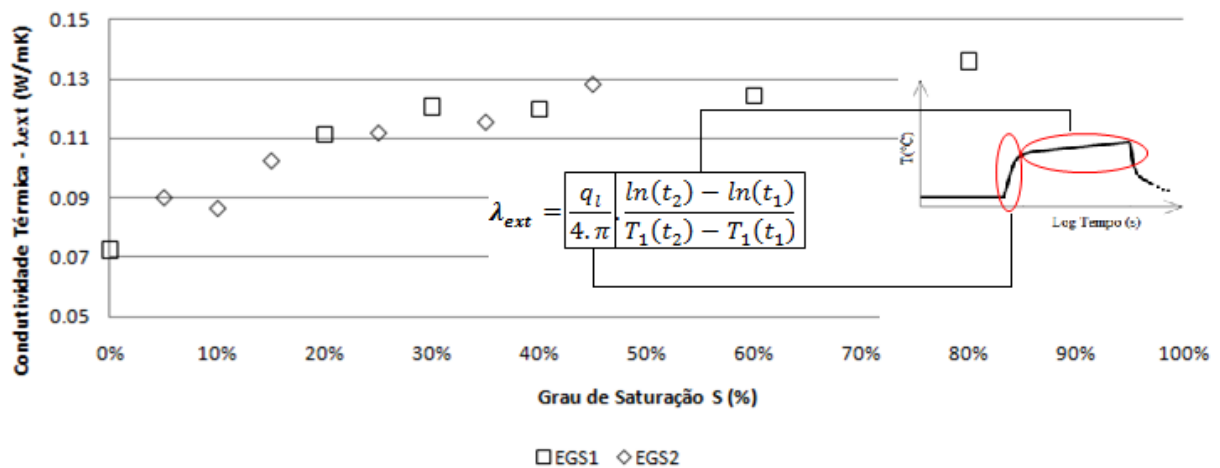


Figura 4.26. Condutividade térmica obtida a partir do modelo de Kristiansen (1982) citado por Goltz e Aufleger (2009).

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo principal desta dissertação foi o desenvolvimento de metodologia para monitoramento de frente de umedecimento e análise da variação do grau de saturação em solos arenosos com base em tecnologia de fibra ótica, tendo-se em vista a importância da água como agente redutor dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

Os modelos utilizados para simulação da condição de campo possibilitaram alcançar o objetivo proposto, porém as condições de contorno foram limitadas com relação às suas dimensões.

A disposição da fibra em forma de helicóide entorno de uma estrutura, seja ela metálica ou plástica, aumentou significativamente a resolução espacial do sistema. Porém, pode ser limitada ao diâmetro em que a fibra é distribuída no entorno das estruturas (Figura 5.1, esquerda) pois, ao ser reduzido, o princípio da condução da luz no interior da fibra pode ser anulado quando o ângulo crítico da sua incidência for superado. Conseqüentemente, o sinal ótico será parcial ou totalmente refratado, ocasionando assim na perda do sinal ótico ou atenuação total do sinal. Já quando ocorre o aumento do diâmetro em que a fibra é distribuída, observam-se dificuldades no seu manuseio, seja durante a distribuição, transporte ou instalação do sistema.

O espaçamento entre as fibras (Figura 5.1, direita) possivelmente alterou os valores de condutividade térmica obtidos através da utilização do modelo de Kristiansen citado por Goltz e Aufleger (2009), pois dependendo da condutividade térmica do solo e conseqüentemente do tempo de aquecimento, a quantidade de calor emitida ao solo que é determinada na fonte de aquecimento (fibra ótica) pode ser aumentada devido à sobreposição da curva de aquecimento gerada por cada volta. Esta limitação não foi levada em consideração nesta dissertação.

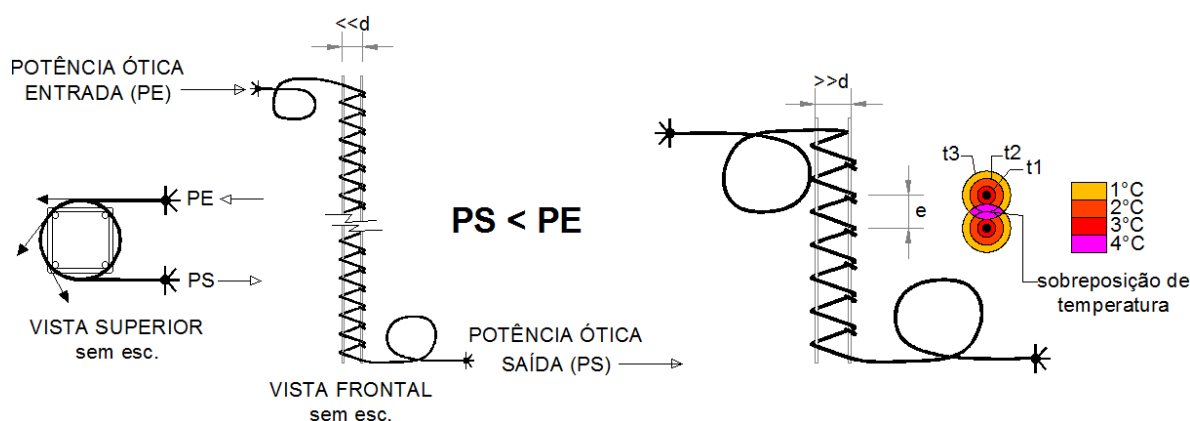


Figura 5.1. Distribuição helicoidal da fibra e suas limitações (do autor).



A precisão do método proposto é dependente do calor de entrada, do diâmetro do cabo e da forma com que o mesmo foi projetado. Para os ensaios realizados, os quais utilizaram o cabo para o método do aquecimento, a quantidade de calor de 12W/m foi suficiente.

O monitoramento da frente de umedecimento pode ser perfeitamente realizado através do emprego do Sistema Helicoidal de Fibra Ótica - SHFO. Sua eficiência pode ser confirmada ao ser comparada com as respostas de sensores de umidade e temperatura posicionados ao longo do modelo e dispostos sobre as mesmas condições de ensaio. Quando a frente se manifestou sob condições diferentes de umidade e conseqüentemente de grau de saturação, pois o índice de vazios se manteve constante, comportamentos distintos puderam ser observados, sendo eles: aumento de velocidade do avanço da frente no E2, justificado pelo aumento da condutividade hidráulica, e redução do gradiente de temperatura no E2 entre o cabo de fibra ótica e a temperatura da água, justificado pelo aumento da condutividade térmica do meio.

A análise do grau de saturação foi realizada através do comportamento das curvas de aquecimento geradas quando da exposição da fibra em solo arenoso, onde apenas o grau de saturação foi alterado. Tanto a inclinação da curva quanto a variação de temperatura foram reduzidos na medida em que o grau de saturação foi aumentado. É observado também que a redução destes parâmetros é maior quando o solo passa do estado seco a uma condição de grau de saturação de 20%, a partir de então pequenas variações são observadas.

Conclusões sobre a variação da densidade do solo também podem ser determinadas a partir da análise das curvas de aquecimento quando da aplicação do método do aquecimento, onde as variações de temperatura são menores quando a densidade é maior, ou seja, a condutividade térmica cresce a partir do aumento da densidade do solo.

## **5.1. Potencialidades do emprego da tecnologia DTS**

O desenvolvimento desta dissertação possibilitou antever metodologias para o emprego da tecnologia DTS no monitoramento de obras geotécnicas. Observa-se que o campo de aplicação desta tecnologia não se limita apenas aos objetivos aqui expostos. Portanto seguem abaixo algumas idéias para sua aplicação:

### **5.1.1. Análise do perfil estratigráfico de solos**

Sendo a condutividade térmica influenciada por fatores como saturação, densidade, composição do material do solo, entre outros, e que esta influência altera o comportamento da curva de aquecimento (Figura 5.2), possivelmente um perfil estratigráfico que apresente

camadas bem definidas de materiais com diferentes condutividades térmicas, possa ser melhor interpretado através da utilização da técnica DTS em consórcio com os métodos convencionais utilizados para tal finalidade, como por exemplo, o SPT.

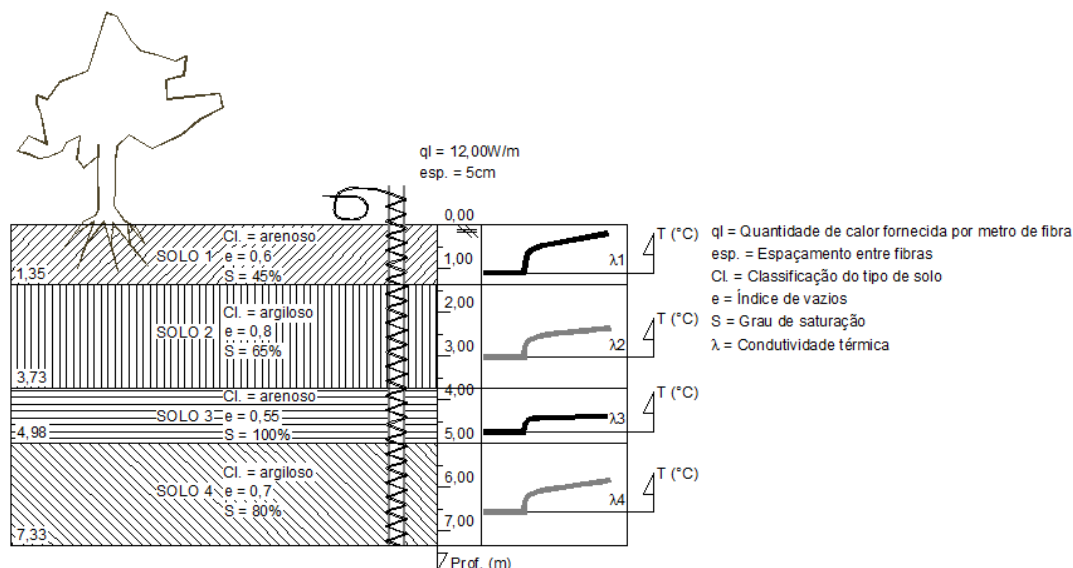


Figura 5.2. Análise do perfil estratigráfico através das curvas de aquecimento (do autor).

### 5.1.2. Identificação do nível do lençol freático

Os resultados dos ensaios realizados para análise do grau de saturação, apresentados no item 5.2, nos mostraram que as curvas de aquecimento geradas pela fibra exposta ao ar possuem um perfil diferente das curvas que representam a fibra imersa em água. Dessa forma, possivelmente a utilização desta técnica para o monitoramento do nível do lençol freático alcance bons resultados (Figura 5.3).

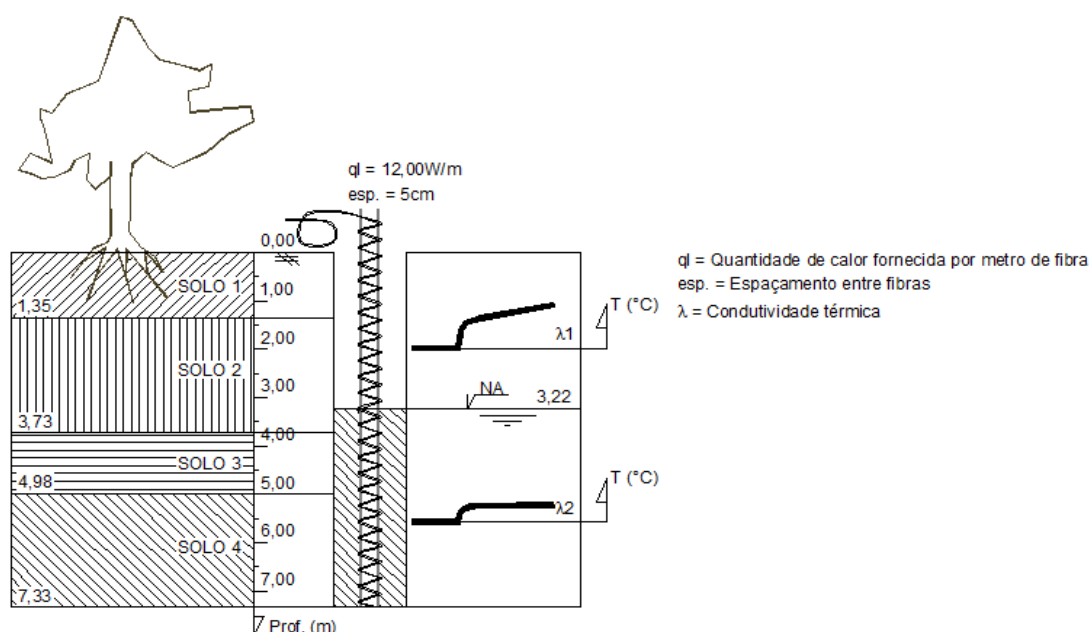


Figura 5.3. Determinação do posicionamento do lençol freático através das curvas de aquecimento (do autor).

## 5.2. Sugestões de trabalhos futuros

### 5.2.1. Monitoramento da frente de umedecimento

- Desenvolvimento de um programa com interface gráfica que determine tanto o posicionamento da frente de umedecimento como a variação do nível do lençol freático, levando em consideração o comportamento da curva de aquecimento;
- Implantação do sistema em campo para levantamento de limitações como: instalação, operação, interpretações de dados e manutenção.

### 5.2.2. Análise da variação do grau de saturação

- Realizar os ensaios em ambientes com dimensões que simulem as condições de contorno prescritas na teoria, ou adaptar a teoria ao sistema desenvolvido.
- Analisar a influência da forma de distribuição da fibra na determinação da condutividade térmica baseando-se na teoria desenvolvida por Kristiansen citado por Goltz e aufleger (2009).

### 5.2.3. Melhoramento do Sistema Helicoidal de Fibra Ótica - SHFO

Nos dois ensaios que objetivaram o monitoramento da frente de umedecimento e a análise da variação do grau de saturação, o solo foi introduzido ou moldado posteriormente a colocação do SHFO no modelo, para que a fibra ficasse diretamente em contato com o meio. No campo esta metodologia de execução é praticamente impossível de se obter. Portanto, se sugere o desenvolvimento de uma estrutura com resistência suficiente para ser introduzida no solo, simulando uma estaca cravada, pois desta forma a condição de contato entre a fibra e o solo simulada em laboratório, possivelmente será alcançada. A esta estrutura, ranhuras com o diâmetro do cabo seriam executadas para que eventuais fragmentos de rocha não afetassem a integridade física do elemento (Figura 5.4).

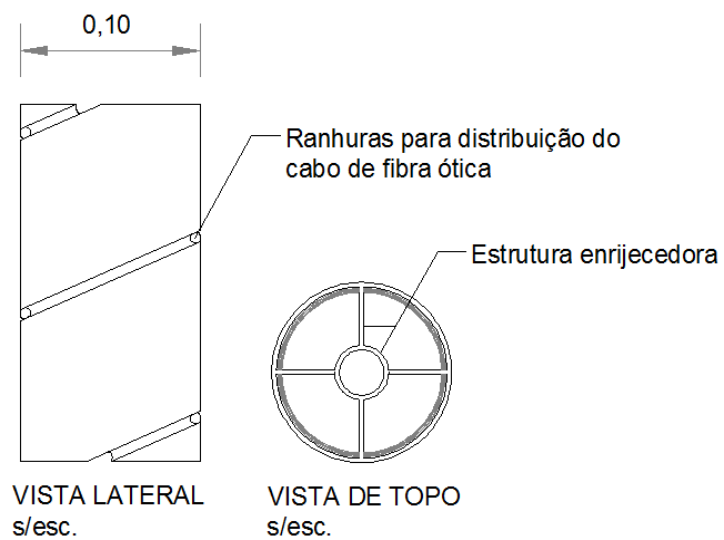


Figura 5.4. Esquema típico para melhoramento do SHFO (do autor).

## REFERÊNCIAS DA LITERATURA

Abu-Hamdeh, N. H.; Khdair, A. I.; Reeder, R. C. **A comparison of two methods to evaluate thermal conductivity of some soils**. Int. J. of Heat and Mass Transfer, 44, S. 1073 – 1078.

ACERVO NOVA FRIBURGO. **Morro da Vilage antes e depois da tragédia**. Disponível em: [HTTP://acervonovafriburgo.blogspot.com/2011/03/morro-da-vilage-antes-e-depois-da.html](http://acervonovafriburgo.blogspot.com/2011/03/morro-da-vilage-antes-e-depois-da.html). Acesso em: 02/02/2011.

AGUIAR, M. F. P.; SILVA FILHO, F. C.; ALMEIDA, M. S. S. **Análise de Movimentos em Encostas Naturais Através de Monitoramento por Instrumentação – Caso Coroa Grande – RJ**. Revista Tecnologia, v. 26, n. 1, p. 46-71, jun. 2005.

AUFLEGER, M. **Verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau**. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Heft 89, 2000.

AUFLEGER, M.; GOLTZ, M. **Why to measure temperature in an embankment dam?** Meeting with LACTEC. Curitiba/Brazil. December, 2009.

AUFLEGER, M.; GOLTZ, M.; KAPPELLER, G. **Grounwater Monitoring Using Distributed flow Velocity Measurements**. In: IAHR International Groundwater Symposium. Flow and Transport in Heterogeneous Sysurface Formations: Theory, Modelling & Applications. Intanbul: Bogazici University, 2008.

BAILEY, D.; WRIGHT, E. **Pratical Fiber Optics**. Inglaterra: Newnes, 2003.

BECKER, B. R.; FRICKE, B. A. **Effects of Saturation and Dry Density on Soil Thermal Conductivity**. Departament of Mechanical and Aerospace Engineering. University of Missouri-Kansas City. August, 1997.

BOSZCZOWSK, R.B. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

CARDOSO Jr, C. R. **Estudo do Comportamento de Um Solo Residual de Gnaisse Não Saturado Para Aliviar a Influência da Infiltração na Estabilidade de Taludes**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

CHOQUET, P.; JUNEAU, F. **Reliability, long-term stability and gage performance of vibrating wire sensors with reference to case histories**. Disponível em: <http://www.rocktest.com>. Acesso em 22 jul. 2003.

ClimChAlp. **Slope Monitoring Methods - A State of the Art Report**. Work Package 6: Monitoring, Prevention & Management of specific effects of climate change on nature, Interreg III B Alpine Space, Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space. (2008).

DUNNICLIFF, John. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. Canada: Wiley, 1988.

EPA – Environmental Protection Agency. **Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Compilation of Simple Mathematical Models**. Volume 1, February, 1998.

FREDLUND, D. G.; XING, A. **Equations for the soil-water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, p. 521-532, 1994.

FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD. **S178 Fusion Splicer User's Manual**. Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8322 Japan, 2010.

GOLTZ, M.; AUFLEGER, M. **Distributed Fibre Optics Temperature Measurements Using the Heat-Up Method – Laboratory tests to determine progression of the wet front**. Relatório apresentado no encontro realizado em dezembro de 2009, entre a universidade de Innsbruck e LACTEC.

GOLTZ, M.; AUFLEGER, M. **Distributed Temperature Measurements with Fiber Optic – Results Evaluation and Compilation**. Relatório apresentado no encontro realizado em dezembro de 2009, entre a universidade de Innsbruck e LACTEC.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes e de escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.194 p.

HOEPFFNER, R. **Distributed Fiber Optic Strain Sensing in Hydraulic Concrete and Earth Structures - Measuring Theory and Field Investigations on Dams and Landslides**. Technishche Universitat Munchen, Munich, December 2008.

JESUS, A. C. **Retroanálise de Escorregamentos em Solos Residuais Não Saturados**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

JESUS, A. C.; MIRANDA, S. B.; CAMPOS, L. E. P.; BURGOS, P. C. **Estudo da Frente de Umedecimento de um Solo Residual da Cidade do Salvador – BA**. Anais do COBRAMSEG 2006. Curitiba, 2006.

KRISTIANSEN, J. I. (1982): **The transient cylindrical probe method for determination of thermal parameters of earth materials**. GeoSkifter No. 18, Laboratory of Geophysics, Aarhus, Denmark.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of Soil Physics**. Marcel Dekker, 2004.

LOYOLA, J. M. T.; PREVEDELLO, C. L. **Modelos analíticos para predição do processo da redistribuição da água no solo**. Rev. Bras. Ciênc. Solo vol. 27 n°5. Viçosa, Setembro à Outubro, 2003.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated Soil Mechanics**. Wiley & Sons Inc. New Jersey, 2004.

MARCHESINI, I. A. **Análise Determinística, Probabilística e de Sensitividade de um Talude Situado na Serra do Mar do Paraná**. Monografia de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

MIQUELETTO, M. **Desenvolvimento de procedimentos numéricos para análise de infiltração e estabilidade de taludes em bacias de drenagem**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2007.

NADIM, F.; LACASSE, S. **Mapping of Landslide Hazard and Risk Along the Pipeline Route**. Terrain and geohazard challenges facing onshore oil and gas pipelines. Londres, 2004.

OMEGA ENGINEERING, Inc. **Economical LVDT's with In-Line Signal Conditioner**, Set.2002, Disponível em: <http://www.omega.com>.

OSAKO, C. I. **A Manutenção dos Drenos nas Fundações de Barragens – O Caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

PERZLMAIER, S.; AUFLEGER, M.; CONRAD, M. **Distributed Fiber Optic Temperature Measurements in Hydraulic Engineering – Prospects of the Heat-up Method**. Proceedings of the 72<sup>nd</sup> Annual Meeting of the International Commission on Large Dams (ICOLD), Seoul, Korea, 16.-22. Mai, 2004.

PERZLMAIER, S. **Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen**. Berichte Des Lehrstuhls Und Der Versuchsanstalt Für Wasserbau Und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Wasserbau und Wasserwirtschaft, Nr. 109, München. 2007.

PERZLMAIER, S.; STASSER, K. H.; STROBL, Th.; AUFLEGER, M. **Integral Seepage Monitoring on Open Channel Embankment Dams by the DFOT Heat Pulse Method**. In: Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Congress of the International Commission on Large Dams (ICOLD), Barcelona, Spain, June, 2006.

PINDER, G. F.; CELIA, M. A. **Subsurface Hydrology**. John Wiley & Sons. New Jersey, 2006.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba, Salesward-discovery, 1996. 446p.

SENSORNET Ltd. **Sentinel DTS User Guide**, SEN2-UM1.0. 2009.

SILVEIRA, R. M. **Propriedades Geotécnicas dos Solos Coluvionares do Gasoduto Bolívia – Brasil em Timbé do Sul (SC)**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

SILVEIRA, R. M. **Comportamento Geotécnico de um Solo Coluvionar de São Vendelino (RS)**. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.



SOARES, A. B. **Fluxo de Água em Talude Arenoso: Modelagem Física e Numérica**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

SMOLEN, J.J.; SPEK, A.V.D. **Distributed Temperature Sensing – A DTS Primer for Oil & Gas Production**. Shell, 2003.

SOWERS, G. F.; ROYSTER, D. L. **Field Investigation**, in: SCHUSTER, R.L & KRIZER, R.J (eds.), **Landslides: analysis and control**. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington DC, Special Report 176, pp. 81-111. 1978.

TANG, A.; CUI, Y.; LE, T. **A Study on thermal conductivity of compacted bentonites**. Ecole des Ponts Paris Tech, France. 2000.

USGS – U.S. **Geological Survey Home page**. Acessado em: 04/06/2009. Disponível em: <http://pbs.usgs.gov/fs/2004/3072/>

VARNES, D.J. **Slope Movements and Types and Processes**, in: SCHUSTER, R.L & KRIZER, R.J (eds.), **Landslides: analysis and control**. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington DC, Special Report 176, pp. 11-33. 1978.

WOLLE, C.M. **Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1988.